



Una mirada investigativa en la ingeniería. Gestión energética y telecomunicaciones



Juan Carlos Castillo Herrera
Juan Camilo López
Juan Esteban Tibaquirá
Álvaro Hernán Restrepo
Ana María López Echeverry

Jovany Bedoya Guapacha
Sebastián López Flórez
Ángel Andrade
Álvaro Restrepo
David A. Serrato

Una mirada investigativa en la ingeniería. Gestión energética y telecomunicaciones

Juan Carlos Castillo Herrera

Juan Camilo López

Juan Esteban Tibaquirá

Álvaro Hernán Restrepo

Ana María López Echeverry

Jovany Bedoya Guapacha

Sebastián López Flórez

Ángel Andrade

Álvaro Restrepo

David A. Serrato



Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión
Universidad Tecnológica de Pereira
2020

Una mirada investigativa en la ingeniería. Gestión energética y telecomunicaciones / Juan Carlos Castillo Herrera y otros. – Pereira : Editorial Universidad Tecnológica de Pereira, 2020.

147 páginas. -- (Colección Trabajos de investigación).

e-ISBN: 978-958-722-497-9

1. Eficiencia energética 2. Consumo de energía 3. Biomasa
4. Vehículos livianos – Emisiones 5. Consumo de combustible
6. Arritmia cardíaca 7. Transformada Wavelet 8. Máquinas de
soporte vectorial 9. Biogás 10. Aprovechamiento de energía
11. Relleno sanitario 12. Gasificación

CDD. 620.1

Una mirada investigativa en la ingeniería. Gestión energética y telecomunicaciones

© Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión

© Universidad Tecnológica de Pereira

Publicación financiada con recursos de la Vicerrectoría de Investigaciones , Innovación y Extensión de la Universidad Tecnológica de Pereira

eISBN: 978-958-722-497-9

Trabajo de Investigación

Universidad Tecnológica de Pereira

Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión

Editorial Universidad Tecnológica de Pereira

Pereira, Colombia

Coordinador editorial:

Luis Miguel Vargas Valencia

luismvargas@utp.edu.co

Teléfono 313 7381

Edificio 9, Biblioteca Central “Jorge Roa Martínez”

Cra. 27 No. 10-02 Los Álamos, Pereira, Colombia

www.utp.edu.co

Montaje y producción:

María Alejandra Henao Jiménez

Universidad Tecnológica de Pereira

Pereira

Reservados todos los derechos

CONTENIDO

CAPÍTULO 1.

Determinación del consumo de combustible y emisiones en vehículos livianos bajo pruebas dinámicas / Determination of the fuel consumption and the emissions of light duty vehicles by Dynamic tess	7
<i>Juan Carlos Castillo Herrera, Juan Camilo López, Juan Esteban Tibaquirá</i>	

CAPÍTULO 2.

Eficiencia energética para vehículos livianos en Colombia / Energy efficiency for light vehicles in Colombia.....	37
<i>Juan Carlos Castillo Herrera, Álvaro Hernán Restrepo, Juan Esteban Tibaquirá</i>	

CAPÍTULO 3.

Caracterización de señales electrocardiográficas para identificación de arritmias cardiacas / Characterization of electrocardiographic signals for identification of cardiac arrhythmias.....	66
<i>Ana María López Echeverry, Jovany Bedoya Guapacha, Sebastián López Flórez</i>	

CAPÍTULO 4.

Modelos de estimación de biogás de relleno sanitario / Landfill biogas models.....	94
<i>Ángel Andrade, Álvaro Restrepo</i>	

CAPÍTULO 5.

Potencial productivo, energético y exergético de biomasa residual agrícola para propósitos de gasificación / Productive, energy and exergy potential of agricultural biomass residues for gasification.....	120
<i>David A. Serrato, Álvaro Restrepo, Juan Esteban Tibaquirá</i>	

1

CAPÍTULO UNO

DETERMINACIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES EN VEHÍCULOS LIVIANOS BAJO PRUEBAS DINÁMICAS

DETERMINATION OF THE FUEL CONSUMPTION AND THE EMISSIONS OF LIGHT DUTY VEHICLES BY DYNAMIC TESTS

Juan Carlos Castillo, Juan Camilo López, Juan Esteban Tibaquirá

Universidad Tecnológica de Pereira

jccastillo@utp.edu.co, juanc.lopez@utp.edu.co, juantiba@utp.edu.co

Resumen

Los vehículos livianos del sector transporte son responsables de altos porcentajes de demanda energética y de emisiones de dióxido de carbono en el mundo. Por lo tanto, se requieren desarrollos normativos que permitan monitorear la energía consumida y las emisiones consecuentes de operación, con el fin de identificar estrategias que permitan reducir los impactos negativos asociados a su operación. En la actualidad, Colombia no cuenta con una normativa que evalúe el consumo de energía y emisiones de los vehículos comercializados en el país. Por este motivo se estructuró una metodología de medición de consumo de combustible y de emisiones soportada en criterios metrológicos, considerando las capacidades técnicas y tecnológicas de los laboratorios del país. En este documento, se describe el protocolo de pruebas, el ciclo de conducción, los principios metrológicos, las características de los equipos, los modelos de cálculo y la evaluación de la incertidumbre de la medición.

Palabras claves: metodología, eficiencia energética, consumo de energía, vehículos livianos, emisiones.

Abstract

Around the world the fleet of light duty vehicles consumes large amounts of energy and produces a high percentage of the CO₂ emissions. Therefore, it is necessary to develop regulations and strategies that allow measuring the energy consumed and the consequent emissions from operation. Currently, Colombia does not have a regulation that assesses the energy consumption and emissions of the light duty vehicles commercialized in the country. For this reason, a methodology for measuring fuel consumption and emissions was designed. This methodology

ported by metrological criteria and is based on the technical capabilities of the laboratories in country. In this work we present: the test protocol, the driving cycle, the metrological principles, materials and methods, the calculation models and the evaluation of the measurement certainty.

words: methodology, energy efficiency, energy consumption, light duty vehicles, emissions.

Introducción

El sector transporte es fundamental en el desarrollo económico y social de los países, puesto que agiliza las actividades económicas, aporta al fortalecimiento de los mercados, y permite la movilidad de personas y mercancías alrededor del mundo. Sin embargo, este sector está caracterizado por ser uno de los principales consumidores de recursos fósiles, los cuales demandan intensos procesos de transformación energética que generan productos perjudiciales para el ambiente, tales como calor, ruido, emisiones contaminantes, y gases de efecto invernadero (GEI). Como resultado, se ha incentivado a diferentes entidades gubernamentales y no gubernamentales, a establecer políticas, programas y estrategias, que hagan del transporte un sector energéticamente eficiente y amigable con el ambiente.

Una de las estrategias implementadas en los últimos años en diferentes países es el etiquetado energético, el cual, consiste en medir y regular tanto las emisiones como el consumo de combustible de los vehículos livianos, para así, imponer cargos tributarios a aquellos que presenten altos costos y emisiones, u ofrecer beneficios económicos y de circulación a los que presenten bajos costos de estos índices, incentivando el uso de vehículos más eficientes. Esta estrategia es posible llevarla a cabo, si se tienen definidos protocolos de medición, de tal forma que todos los vehículos sean evaluados bajo las mismas condiciones de operación. Para ello, es necesario conocer variables clave del vehículo, que faciliten un criterio de comparación y definir una metodología para su medición. Por lo tanto, en este documento se identifica el consumo de combustible como el parámetro a través del cual podría establecerse la evaluación, el control y la regulación de la eficiencia de operación de los vehículos. Adicionalmente, se describe una metodología repetible y reproducible basada en lineamientos internacionales, que se puede emplear para la medición de consumo de combustible en vehículos livianos mediante pruebas dinámicas automotrices, la cual, establece como punto de partida para impulsar el etiquetado energético vehicular en Colombia.

Plantamiento del problema y justificación

Ante las necesidades actuales de hacer eficiente el uso de la energía y los compromisos globales de disminuir las emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero – GEI relacionada con los procesos de transformación energética, el sector transporte como el usuario del 20% de la energía y el productor del 23% del CO₂ a nivel mundial [1], se ve obligado a identificar estrategias para realizar su evaluación, monitoreo y constante mejora, de tal forma que se propenda alcanzar el transporte sostenible [2].

En este sentido, la evaluación del desempeño ambiental y la eficiencia de los vehículos livianos del sector transporte por carretera se ha vuelto una necesidad, puesto que, permite extraer indicadores y establecer regulaciones o políticas [3]. Actualmente, algunos países proponen implementar etiquetas energéticas obligatorias en los vehículos que están siendo comercializados con el fin de informar sobre el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ que los vehículos presentan, así concientizar el uso al consumidor desde la compra e incentivar a la compra de aquellos que presentan mejores estándares [4–7]. La industria automotriz a nivel mundial realiza la medición del consumo de combustible mediante ensayos basados en pruebas dinámicas, en las cuales, se llevan a cabo en equipos dinamométricos que simulan las condiciones de operación en la ruta de los vehículos. Para ello, es necesario establecer metodologías confiables donde se puedan cuantificar las incertidumbres e introducir factores a las métricas realizadas [8,9].

En Colombia, no se realizan evaluaciones bajo prueba dinámica a los vehículos comercializados en el territorio nacional, dado que la legislación únicamente reglamenta los niveles permisibles de emisiones de gases contaminantes, los cuales son evaluados mediante prueba estática en los centros de diagnóstico automotriz, y únicamente exige en la importación presentar un certificado de emisiones bajo el protocolo de Montreal. Por lo tanto, se identifica que establecer una metodología de medición de consumo de combustible bajo pruebas dinámicas, es el paso inicial para evaluar la eficiencia energética de los vehículos en Colombia. Para identificar el potencial de mejorar estrategias tecnológicas u operacionales, y fomentar el etiquetado energético vehicular, lo podría contribuir a la seguridad energética, reducir la contaminación y ayudar a los consumidores.

Objetivos

Objetivo general:

Describir los procedimientos generales y los métodos de cálculo para la medición del consumo de combustible y emisiones de los vehículos livianos bajo pruebas dinámicas automotrices en Colombia.

Objetivos específicos:

1. Establecer una metodología de medición de consumo de combustible para vehículos livianos, basada en estándares internacionales, considerando los coeficientes de resistencia al movimiento y las capacidades de los laboratorios nacionales.
2. Desarrollar un modelo de estimación de la incertidumbre del proceso de medición de las variables físicas involucradas en la determinación de los coeficientes de resistencia al movimiento del vehículo.
3. Definir el modelo de estimación de la incertidumbre de los procesos de medición asociados a la metodología.

Referente teórico

La Comisión Panamericana de Normas Técnicas - COPANT tiene diferentes proyectos que están siendo desarrollados y que involucran directamente a Colombia, uno de estos es la propuesta de norma de Eficiencia Energética en Vehículos Livianos de Pasajeros y Comerciales Livianos, mediante la cual, se establecen las características que deben poseer las etiquetas de eficiencia energética de los vehículos livianos de pasajeros y comerciales livianos. Para ello, el proyecto de norma tiene como referentes las siguientes normativas internacionales: el Reglamento No. 83 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE), y el CFR (*Code of Federal Regulations* de los Estados Unidos de América) Título 40 – Parte 86. Sin embargo, considerando que el alrededor del 40 % de los vehículos comercializados en Colombia provienen de países que implementan protocolos de pruebas vehiculares basados en la metodología estadounidense, se determina que es la más apta para la realización de ensayos

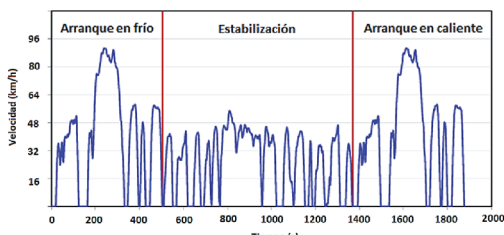
Generalidades en la medición del consumo de combustible

La medición del consumo de combustible se realiza con base en los lineamientos del código de regulación CFR 40 de los Estados Unidos. Esta metodología establece que la medición puede realizarse mediante tres métodos: balance de carbonos, gravimétrico y volumétrico. En este documento se analiza el método gravimétrico, puesto que permite realizar un seguimiento centralizado de una sola variable en tiempo real y se ajusta a las capacidades técnicas y tecnológicas de los laboratorios del país. Este método, consiste en medir la masa del combustible empleada durante la ejecución del ciclo de conducción. De esta forma, midiendo la distancia recorrida y la densidad del fluido, puede estimarse el consumo de combustible del vehículo.

La metodología utiliza el Procedimiento Federal de Prueba (FTP-75), el cual es un ciclo de conducción urbano empleado para ser simulado en dinamómetro de rodillos, y surge como derivación del ciclo FTP-72, con una adición de una tercera fase de 505 segundos, idéntica a la primera fase del FTP-72 pero con arranque en caliente, tal como se muestra en la Figura 1.

Figura 1.

Ciclo de conducción estadounidense EPA FTP-75.



Esquema metodológico

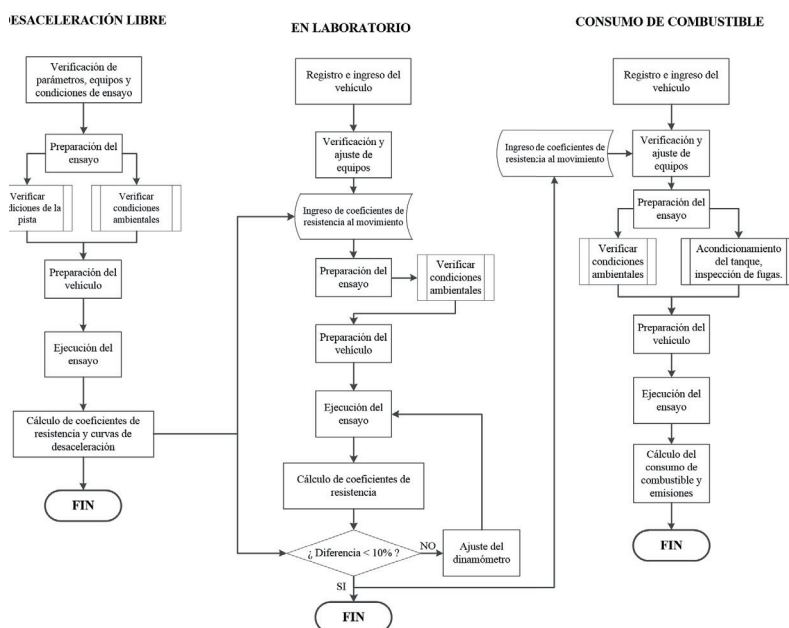
La metodología de consumo de combustible está compuesta por tres etapas. La primera, con el ensayo de desaceleración libre en ruta, también conocido como *Coast Down*, donde se estiman los coeficientes de resistencia al movimiento de cada vehículo. En la segunda etapa, los coeficientes se ingresan al programa de control del dinamómetro de rodillos, con el fin de ajustar el ciclo de conducción.

iza la prueba de consumo de combustible considerando los coeficientes de resistencia al movimiento estimados para cada vehículo en particular.

procedimiento metodológico técnico general se presenta a continuación en la Figura 2.

Figura 2.

Procedimiento metodológico para la medición del consumo de combustible.



Metodología

En la continuación, se definen las características de los equipos utilizados, el protocolo para las diferentes pruebas existentes en la metodología de medición del consumo de combustible de los

Equipos

Balanza: para la medición de la masa de combustible consumida durante el ensayo.

Especificación mínima:

- División de escala: 0,5 g.

Unidad meteorológica: para la medición de las condiciones ambientales. Especificación mínima:

- Medición de velocidad de viento con una precisión de $\pm 2\%$.
- Medición de temperatura ambiente con una precisión de $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Medición de humedad con una precisión de $\pm 2\%$ HR a 50% HR, y una resolución de $0,1\%$ HR.
- Medición de presión absoluta y relativa, con una precisión de $\pm 1,5\text{ hPa}$ a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Termómetro infrarrojo: para la medición de la temperatura de los rodillos o ruta antes, durante y después de la ejecución de las pruebas. Especificación mínima:

- Resolución: $0,5/1\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Tiempo de respuesta: 0,25 s.

Hidrómetro o densímetro de vidrio de inmersión: para la medición de la densidad del combustible de prueba. Especificación mínima:

- Precisión $0,001\text{ g/cm}^3$ a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Cinta métrica: para la medición del diámetro de los rodillos del dinamómetro. Especificación mínima:

- Resolución: 0,01 mm. • Precisión: $\pm 0,03\text{ mm}$.

Contador digital programable: para el conteo de revoluciones del rodillo, a partir de la señal del *encoder* del dinamómetro.

Especificación mínima:

- Estabilidad de 6 dígitos LED.

Manómetro: para el ajuste de la presión de los neumáticos del vehículo.

ración del vehículo. Es utilizado para identificar variables de interés, tales como: velocidad, revoluciones del motor, flujo de combustible, velocidad, altitud, entre otras.

ensayo de desaceleración libre

El ensayo de desaceleración libre (*Coast Down*) en ruta, consiste en desacelerar el vehículo en una pista recta y plana, desde una velocidad inicial hasta una velocidad final establecida por la prueba. El ensayo se realiza con la transmisión en neutro, se determina el tiempo requerido por el vehículo para completar la desaceleración. Esto permite estimar los coeficientes de resistencia a la rodadura y aerodinámica del vehículo. El procedimiento para llevar a cabo los ensayos se presenta a continuación:

verificación de parámetros de ensayo

Registrar la magnitud de la temperatura ambiente y humedad relativa.

Verificar que la temperatura ambiente permanezca entre 5 °C y 35°C a la sombra [10].

Registrar la magnitud de la presión atmosférica.

Verificar que la prueba se realice a una presión atmosférica entre 91 kPa y 104 kPa.

Registrar la magnitud de las componentes tangencial y transversal de la velocidad del viento.

Registrar la magnitud de temperatura de la pista.

Realizar recorrido piloto a lo largo de la pista a una velocidad constante entre 40 km/h y 60 km/h, registrar las variaciones de nivel de la pista.

Verificar que la pista de prueba sea lisa, se encuentre seca, y la pendiente no exceda el 0,5%. El desnivel del final de la pista respecto al inicio no debe exceder el 1,5%.

Verificar que la profundidad de sus surcos de las cubiertas de las llantas se encuentre entre el 90% y el 50% del valor del neumático sin uso.

Ajustar la presión de los neumáticos de acuerdo con las recomendaciones del fabricante o a las especificaciones de la etiqueta del neumático.

Inspeccionar la superficie de los neumáticos y verificar que no se presenten incrustaciones que alteren la rodadura,

12. Verificar que la instalación de los dispositivos de medición no altere el desempeño, estabilidad y aerodinámica el vehículo, así como las condiciones de manejo del conductor [11].
13. Antes de la realización de las pruebas, verificar la correcta operación de los equipos.

Recomendaciones previas a la ejecución del ensayo

1. Verificar el balanceo de las ruedas, la regulación de la suspensión y los frenos, así como la alineación de la dirección del vehículo.
2. Verificar que las superficies del vehículo se encuentran limpias y las ventanas se encuentran cerradas antes y durante la ejecución de los ensayos.
3. Desconectar o dejar inoperante el sistema de acondicionamiento de aire del vehículo y otros equipos auxiliares como sistemas de iluminación y entretenimiento.
4. Realizar 20 ensayos, agrupados en 10 pares (ida y vuelta – ambos sentidos de la pista seleccionada), de las cuales se seleccionan los 5 mejores pares para el cálculo de los coeficientes de resistencia aerodinámica y a la rodadura.
5. Si durante la prueba es necesario accionar los frenos, el ensayo debe ser interrumpido.
6. Realizar la medición de la presión, la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento en la mitad de la pista.
7. Incluir la masa de los equipos de medición, así como la masa del personal que realiza la prueba como parte la masa del vehículo.
8. La masa de los equipos de medición y del personal deben ser de 136 kg [10]. De no alcanzarse este valor, debe añadirse un lastre.
9. La pista debe ser recta, y su superficie debe ser de hormigón o asfalto en buen estado.
10. Verificar que sobre la superficie de la pista no se encuentren restos de materiales punzantes y/o desperdicios que afecten la rodadura.
11. La presión y la temperatura estándar requeridas para la corrección de los resultados debe ser: 101,325 kPa y 293,15 K.
12. La prueba no debe ser ejecutada si se presenta niebla que dificulte la visibilidad.
13. Suspender la realización de los ensayos si se presentan velocidades del viento superiores a 3 m/s para la componente longitudinal y/o 2 m/s para la componente transversal. Las mediciones deben realizarse a una altura aproximada de 70 cm de la pista de ensayos.
14. Realizar los ensayos con el tanque de combustible lleno.

No se requiere utilizar combustible patron.

Realizar un precalentamiento del vehículo por alrededor de 30 minutos.

Conducción del ensayo

Posicionar el vehículo en la línea de partida.

Girar el volante completamente de izquierda a derecha y de derecha a izquierda.

Registrar la magnitud de la temperatura ambiente y humedad relativa.

Registrar la magnitud de la presión atmosférica.

Registrar la magnitud de las componentes tangencial y transversal de la velocidad del viento.

Registrar la magnitud de temperatura de la pista.

Acelerar el vehículo manteniendo un curso recto y constante hasta alcanzar una velocidad igual o superior a 85 km/h (23,61 m/s) e iniciar la desaceleración libre del vehículo desacoplando la transmisión sin accionar el freno y evitando dejar accionado el embrague.

En el momento en el que el vehículo alcance una velocidad de 80 km/h (22,22 m/s) iniciar el registro de velocidad y tiempo hasta que la velocidad del vehículo llegue a un valor de 30 km/h (8,33 m/s).

Repetir inmediatamente el ensayo, conduciendo en dirección opuesta sin accionar el freno al girar.

Ejecutar los pasos 3 a 9, hasta completar diez (10) pares de registros (ida y vuelta).

Calcular los coeficientes de resistencia al movimiento.

Ensayo de desaceleración libre en laboratorio

El ensayo de desaceleración libre (*Coast Down*) en laboratorio, consiste en desacelerar el vehículo en el dinamómetro de rodillos, desde una velocidad inicial hasta una velocidad final establecida por la prueba, e ingresando al programa de control del equipo los coeficientes de resistencia al movimiento obtenidos a través del ensayo de desaceleración libre en ruta. El ensayo se realiza con la transmisión en neutro, se determina el tiempo requerido por el vehículo para completar la desaceleración, con el fin de estimar las cargas ejercidas por el dinamómetro sobre el vehículo, y posteriormente ejecutar los procedimientos de ajuste del equipo para replicar las gas obtenidas en ruta.

Verificación de parámetros y condiciones de prueba

1. Registrar la magnitud de temperatura ambiente y humedad relativa.
2. Verificar que la prueba se realice a una temperatura ambiente entre 5 °C y 35°C.
3. Registrar la magnitud de la presión atmosférica.
4. Registrar la magnitud de temperatura de los rodillos.
5. Ajustar la presión de los neumáticos de acuerdo con las recomendaciones del fabricante o como se especifica en la etiqueta del neumático.
6. Inspeccionar la superficie de los neumáticos y verificar que no presenten incrustaciones que alteren la rodadura.
7. Verificar que la instalación de los dispositivos de medición no altere el desempeño y estabilidad del vehículo, así como las condiciones de ejecución de la prueba.
8. Verificar la correcta operación de los equipos.

Recomendaciones previas generales

1. Verificar el balanceo de las ruedas, el funcionamiento regular de la suspensión y los frenos, así como la alineación de la dirección del vehículo.
2. Desconectar o dejar inoperante el sistema de acondicionamiento de aire del vehículo y otros equipos auxiliares como sistemas de iluminación y entretenimiento.
3. Incluir la masa de los equipos de medición, así como la masa del personal que realiza la prueba como parte de la masa del vehículo.
4. El vehículo de prueba debe tener mínimo 3000 km de rodaje.
5. Realizar los ensayos con el tanque de combustible lleno.
6. No se requiere utilizar combustible patrón para la ejecución de los ensayos.

Ejecución del ensayo

1. Verificar las condiciones del vehículo.
2. Posicionar y alinear el vehículo sobre el dinamómetro de rodillos.
3. Anclar el vehículo y ubicar el extractor de gases en el tubo de escape.
4. Verificar la correcta operación de los sistemas del dinamómetro.
5. Fijar la inercia equivalente y la potencia indicada en el dinamómetro.

Ingresa los valores de los coeficientes de resistencia al movimiento f'' y $f_{\#}$, obtenidos en la prueba de desaceleración en ruta, al programa de control del dinamómetro. Conectar los dispositivos de medición de velocidad y tiempo. Precalentar el vehículo accionando el dinamómetro hasta alcanzar una velocidad constante de 80 km/h, por un tiempo mínimo de 20 minutos [10]. Después de los 20 minutos, desacelerar el vehículo a 0 km/h. Iniciar el ensayo acelerando el vehículo a una velocidad igual o superior a 105 km/h e iniciar la desaceleración libre del vehículo desacoplando la transmisión, dejando la marcha en neutro sin accionar el freno. Dejar desacelerar el vehículo hasta alcanzar una velocidad de 30 km/h. Repetir el procedimiento de desaceleración del vehículo (Pasos 11 y 12) hasta alcanzar diez (10) repeticiones. Realizar el proceso de cálculo de los coeficientes de restricción al movimiento en laboratorio.

Anterior al cálculo, se comparan las curvas de desaceleración obtenidas en ruta con las obtenidas en laboratorio y se procede a realizar el respectivo ajuste. En caso tal de que los resultados no sean comparables, se deben reajustar los coeficientes de resistencia al movimiento ingresados en el software del dinamómetro, y ejecutar nuevamente el ensayo. Este proceso debe ser reiterativo hasta tener una desviación no mayor al 10%.

Anterior es realizado con el fin de ajustar las cargas ejercidas por el dinamómetro y ejecutar los ensayos de consumo de combustible. Por último, se efectúa el ensayo de consumo de combustible, como se describe a continuación.

Ensayo de consumo de combustible

La medición del consumo de combustible se realiza mediante el método gravimétrico, el cual consiste en medir la masa de combustible consumido durante la ejecución del ciclo de conducción. De esta forma, midiendo la distancia recorrida y la densidad del combustible, puede estimarse el consumo de combustible del vehículo.

Condiciones previas

La ejecución de los ensayos debe realizarse con combustible patrón.

Antes de la ejecución de los ensayos, el vehículo debe permanecer a una temperatura ambiente controlada entre 20 °C y 30 °C, por un lapso mínimo de una (1) hora.

- h. Realizar la verificación y calibración de los equipos de medición.
- i. Ajustar la presión de aire de las llantas del vehículo al valor recomendado por el fabricante o como se especifica en la etiqueta del neumático.
- j. Inspeccionar la superficie de las llantas y verificar que estas no presenten incrustaciones que alteran la rodadura.
- k. Fijar la inercia equivalente y la potencia indicada en el dinamómetro.
- l. Ingresar los valores de los coeficientes de resistencia al movimiento f^* y $f_{\#}$ ajustados, obtenidos en la prueba de desaceleración libre en laboratorio, al programa de control del dinamómetro.
- m. Posicionar el vehículo sobre el dinamómetro con el motor apagado.
- n. Anclar el vehículo.
- o. Conectar el ducto de extracción de los gases de escape, al tubo de escape del vehículo.
- p. Abrir el capó del vehículo y posicionar el ventilador de refrigeración.
- q. Desconectar o dejar inoperante el sistema de acondicionamiento de aire del vehículo y otros equipos auxiliares como sistemas de iluminación y entretenimiento.
- r. Conectar el dispositivo de medición de masa de combustible.
- s. Verificar que la temperatura ambiente esté entre 20 °C y 30 °C, que la humedad relativa sea menor al 75%, y registrar la presión atmosférica de la prueba.

Ejecución del ensayo

- a. Encender el dispositivo de medición de masa de combustible, el medidor de tiempo, y el indicador gráfico del ciclo de conducción, y proceder a encender el motor. Este momento corresponde al instante cero del ciclo de conducción.
- b. Engranar la 1ª. Marcha 15 s después de encender el motor.
- c. Comenzar la aceleración inicial del vehículo en el ciclo de conducción y operar de acuerdo con el ciclo de conducción.
- d. Apagar el motor dos segundos después de finalizar la última desaceleración.
- e. Registrar la masa de combustible consumido.
- f. Registrar el número de revoluciones del rodillo y ajustar el cero del contador.

Modelos de cálculo

Continuación, se presentan los modelos de cálculo de los coeficientes de resistencia al movimiento y del consumo de combustible.

Cálculo de coeficientes de resistencia al movimiento

Los coeficientes de resistencia al movimiento por rodadura, f'_r , y por arrastre aerodinámico, f'_a , son obtenidos a partir de las ecuaciones (1) y (2).

$$f'_r = f'_r [1 + k_+(T - T^*)] \quad (1)$$

donde,

f'_r : Coeficiente de resistencia a la rodadura corregido [N].

f'_r : Coeficiente de resistencia a la rodadura sin corrección [N].

k_+ : Factor de corrección por temperatura, estimado en $8,6 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

T : Temperatura ambiente en la pista en cada desaceleración, expresada en K.

T^* : Temperatura de referencia, igual a 293,15 K.

$$f'_a = \frac{2P^* T^* T^* (f'_a - K_6 f'_a) + K_6 f'_a}{P}$$

donde,

f'_a : Coeficiente de resistencia aerodinámica corregido [$\text{N}/(\text{m/s})^2$].

f'_a : Coeficiente de resistencia aerodinámica sin corrección [$\text{N}/(\text{m/s})^2$], K_6 : Factor de corrección por temperatura, estimado en $2,503 \times 10^{-4} (\text{m/s})^2$.

P : Presión atmosférica en la pista en cada desaceleración, expresada en kPa.

P^* : Presión de referencia, igual a 101,325 kPa.

Los coeficientes de resistencia a la rodadura f'_r y aerodinámica del vehículo f'_a , se calculan como el promedio de los coeficientes calculados para cada ensayo, como se expresa en las ecuaciones (3) y (4).

$$f'_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f'_{r,i}$$

?AB

$$f'_{\#} = \langle 2n4f'_{\#}, ? \rangle$$

?AB

Los coeficientes $f'_{n,\gamma}$, $f_{\#,\gamma}$ son obtenidos a través de curvas experimentales modeladas para γ de desaceleración, tal como se presenta en la Tabla 1. Así, estos coeficientes son calculados por medio de las ecuaciones (5) y (6).

Tabla 1. Determinación de los coeficientes de resistencia al movimiento.

	v_M	v $= \frac{MPB_{\Delta t^-}}{1}$	v $\bar{v} = \frac{MPB + v}{2}$	$\bar{v}M^\#$	$\bar{v}M^T$	$aM\bar{v}M^\#$
.
.
.
n		$@$	$@ <$	$@$	$@ <$	$@$
		$<$	\bar{v}_M	$<$	\bar{v}_M^T	$<$
		a_M	MAB	$\bar{v}_M^\#$	MAB	$aM\bar{v}M^\#$

[illegible]

$$V_{\Sigma @ \vec{v}TX(\Sigma @ a)} - V_{\Sigma @ \vec{v}#XV\Sigma @} a \vec{v}#X$$

$$\# , ? \quad \frac{(u - 1) \mathcal{L}}{\textcircled{MAB} \vec{v}MT} - V_{\Sigma @ \textcircled{MAB} \vec{v}M#X\#} \quad [\quad (u)$$

do k es el número de ensayos, y m_l la masa equivalente del vehículo, expresada c

- m_l : Masa del vehículo [kg].
- $m_{M@j}$: Masa de los equipos e instrumentos de medición [kg].
- $m_{_}$: Masa de conductor y ocupantes [kg].
- $m_{\cdot a}$: Masa equivalente a la inercia de rotación [kg].

La masa equivalente de inercia de rotación ser estimada como aproximadamente el 3% de la suma de la masa del vehículo, la masa de los equipos de medición y la masa de los ejecutantes, tal como se presenta en las ecuaciones (8) [10]:

$$m'_{\cdot a} = e\%(m_{\setminus} + mM_{\textcircled{}})^{\wedge} + m_{_} \quad (8)$$

- $e\% = 0,03$

Se debe considerar que el coeficiente de variación CV obtenido para los coeficientes f'^{\cdot} , $f'_{\#}$ debe ser menor al 10% [10]. Estos coeficientes, permiten establecer la variabilidad de los coeficientes de resistencia al movimiento f'^{\cdot} , $f'_{\#}$ respecto al valor de su media estimada $fdd'd^{\cdot}d$, $fdd'd_{\#}d$, y pueden calcularse mediante la ecuación (9).

$$CVg'i \equiv \sigma fddg'dk''d\Gamma,$$

$$CVg'l = \sigma fddg'dk\#dl \quad (9)$$

- σ_{gki} , representan la desviación estándar de los coeficientes de resistencia a la rodadura.
- σ_{gkl} , resistencia aerodinámica calculados para cada ensayo.

El cálculo del consumo de combustible se realiza mediante la ecuación (10):

$$C = \frac{\pi \cdot N \cdot D \cdot \rho_{\text{rst}}}{m}$$

- C , es el consumo de combustible del vehículo en km/l,
- m , es la masa consumida de combustible,
- N , el número de vueltas dadas por el rodillo durante la prueba,
- D , es el diámetro de los rodillos,
- ρ_{comb} , es la densidad del combustible de prueba.

Cálculo de consumo de combustible corregido

El consumo de combustible corregido es calculado a partir de la ecuación (11).

$$C_c = \frac{C}{\Delta E' / W_s} \quad (11)$$

Siendo W_s la energía total requerida por el vehículo para vencer las fuerzas resistivas impuestas durante la ejecución del ciclo de manejo FTP-75, $\Delta E'$ la disipación de energía debido a la presencia de fuerzas de resistencia al movimiento por rodadura y fuerzas aerodinámicas y C_c el consumo de combustible calculado a partir de la ecuación (10). La estimación del gasto energético, W_s , es obtenido a partir de la ecuación (12):

$$W_s = \int_0^t (V P_{x,M} + P_{x,MPBX}) dt \quad (12)$$

La energía total requerida $\Delta E'$ puede calcularse mediante la ecuación (13).

energía total disipada durante la simulación del ciclo de manejo FTP-75, ΔE_{yz} , asociada a las fuerzas resistivas por rodadura y efectos aerodinámicos puede expresarse a través de la ecuación

$$\Delta E_{yz} = \frac{1}{MAB} \left(\int_0^s V P_{\text{rod}} ds + \int_0^s P_{\text{aer}} ds \right) \Delta t \quad (14)$$

Por lo tanto, la potencia debido a las fuerzas resistivas debido a la rodadura y los efectos aerodinámicos puede expresarse a través de la ecuación (15).

$$P_r = f_r v(t) + f_a v^2(t) \quad (15)$$

Por lo tanto, Dadas las condiciones de ejecución de los ensayos y las capacidades técnicas y metodológicas empleadas en el desarrollo y validación de la presente metodología, puede considerarse un valor de referencia para la incertidumbre por repetibilidad de aproximadamente 72 km/l.

Estimación de las emisiones de CO₂

Anterior al cálculo de consumo de combustible, se procede a realizar la estimación de las emisiones de CO₂ de los vehículos.

Para los vehículos a gasolina, las emisiones de CO₂ pueden estimarse a partir de la ecuación (16)

$$\frac{\text{Emisiones de CO}_2 \text{ (kg)}}{\text{kilómetro}} = \frac{\text{Consumo (L/100 km)} \times 2,347}{100} \quad (16)$$

Para los vehículos livianos diésel, las emisiones de CO₂ pueden estimarse con la ecuación (17) [12].

$$\frac{\text{Emisiones de } \text{CO}_2 \text{ (kg)}}{\text{kilómetro}} = \frac{2,689}{(17)} \quad \text{p. 1}$$

Resultados y conclusiones

Como resultado del trabajo realizado se obtuvo una metodología para la medición del consumo de combustible y las emisiones de

El para vehículos livianos en Colombia, la cual estuvo basada en el Código de Regulación Federal de los Estados Unidos – CFR 40, y el ciclo de manejo FTP 75. Esta metodología fue implementada en el Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices de la Universidad Tecnológica de Pereira, y se evaluó en un vehículo Chevrolet Aveo modelo 2010 con motor de 500 cm³. Los resultados fueron comparados con información disponible en los programas de etiquetado vehicular de Estados Unidos y de Chile, obteniéndose una diferencia del 5,18% en el consumo de combustible y 1,11% en las emisiones de CO₂.

Por otro lado, se definieron los procedimientos, las especificaciones técnicas de los equipos, y el protocolo de pruebas para llevar a cabo la medición del consumo de combustible a través del método gravimétrico, puesto que las capacidades tecnológicas y de infraestructura de los laboratorios en Colombia favorecen su implementación. Así mismo, se establecieron los criterios de aseguramiento metrológico necesarios para garantizar la repetibilidad y confiabilidad en los resultados. Adicionalmente, se construyó un modelo matemático para el cálculo de consumo de combustible y para el ensayo *Coast Down*, así como el cálculo de la incertidumbre del proceso de medición.

Por último, mediante la colaboración al personal del laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices de la Universidad Tecnológica de Pereira y del Instituto Nacional de Metrología, Colombia cuenta con una metodología estructurada a través de rigurosos criterios metrológicos, lo que permite garantizar la repetibilidad, reproducibilidad y confiabilidad de los resultados, la cual se posiciona como la base para establecer un protocolo nacional de medición de consumo de combustible y emisiones para vehículos livianos en Colombia.

EXO 1 - Modelo de estimación de incertidumbre de los coeficientes de resistencia al movimiento

En la ecuación (1) se presenta el modelo de cálculo de la varianza combinada de variable de interés, en función de las mediciones realizadas para su estimación [13].

$$u_{\#}(y) = \sqrt{2 \sum_{AB} \left(\frac{\partial y}{\partial x_M} \right)^2 u(x_M) + u_a^2} \quad (1)$$

$u_{\#}(y)$: Varianza combinada,

$\frac{\partial y}{\partial x_M}$: Coeficientes de sensibilidad,

u_a :

$u(x_M)$: Incertidumbre estimada asociada a cada entrada x_M ,

\sum : Varianza estimada por repetibilidad,

y : Mensurando. Para el caso de estudio y hace referencia a los coeficientes de resistencia al movimiento,

x_M : Coeficientes de resistencia al movimiento, asociado al modelo analítico.

La incertidumbre típica combinada, $u_{\#}(y)$, equivale a la raíz cuadrada de la varianza combinada, $u_{\#}^2(y)$, y es una medida de la dispersión de los valores atribuidos al mensurando, y , y es igual a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la varianza de la salida, y . Es decir, la varianza combinada equivale a la sumatoria de los cuadrados de la incertidumbre de cada entrada, x_M , multiplicado por el coeficiente de sensibilidad, $\frac{\partial y}{\partial x_M}$, para cada una de las entradas [13].

u_a :

Modelo de estimación de la incertidumbre expandida

En la ecuación (2) se presenta el modelo de estimación de la varianza combinada $u_{\#}(f_{\#})$, asociada a los coeficientes de resistencia al movimiento $f_{\#}$ y $f_{\#}$, expresadas en las ecuaciones (2):

$$\frac{\partial f}{\partial u} = \frac{f''(u)}{2f'(u)^2} + \dots$$

$$\begin{aligned} & \partial f_{\# \#} - \partial f_{\#} \\ u(f'')_{\#} = & 2 \partial T^4 u(T) + 2 \partial P^4 u(P) - 2 \partial d f'_{\# \# \# \#} u(f'_{\#}) + 2 \partial d f'_{\# \# \# \#} u(f''')_{\#} + \\ & 2 \partial d f'_{\# \# \# \#} u(f'')_{\#} \end{aligned} \quad (3)$$

donde, el intervalo de confianza de los coeficientes de resistencia al movimiento se expresa:

$$f\mathbf{I}_* - U(f_*) \leq f\mathbf{I}_* \leq f\mathbf{I}_* + U(f_*),$$

$$f\mathbf{I}_\# - U(f_\#) \leq f\mathbf{I}_\# \leq f\mathbf{I}_\# + U(f_\#) \quad (4)$$

$U(f_{+})$, $U(f_{\#})$ son la incertidumbre expandida de los coeficientes de resistencia a la rodadura y resistencia aerodinámica respectivamente, los cuales puede ser calculados como se presenta a continuación:

$$U(f^n) = k. u(f^n),$$

$$U(f_{\#}) = k. u(f_{\#}) \quad (5)$$

- k el factor de cobertura
- $u(f^*)$, incertidumbre combinada estimada para el coeficiente de resistencia a la rodadura
- $u(f_{\#})$, incertidumbre combinada estimada para el coeficiente de resistencia aerodinámica

El factor de cobertura k es 2, permitiendo establecer un nivel de confianza de aproximadamente 95%, si se considera una distribución de probabilidad normal [13].

A continuación, se presenta el modelo de incertidumbre asociado a la medición de las variables físicas en los ensayos de desaceleración. Para ello, se realiza un cambio de variable en las ecuaciones (6) y (7), redefiniendo $a_M = (v_{MPB} - v_M)/\Delta t$ y $\bar{v}_M = (v_{MPB} + v_M)/2$ así:

$$v^p = v_{\text{MPB}} + v_{\text{M}} \quad (1)$$

$$\mathcal{V} = \mathcal{V}_{\text{MPR}} - \mathcal{V}_{\text{M}} \quad (1)$$

varianza combinada $u^{\#}(f'_{\#})$, $u^{\#}(f'_{\#})$ para los coeficientes de resistencia al movimiento, se resa a través de las ecuaciones (9) y (10).

$$f'^{\#}_k = U \left\langle \frac{\partial \partial v f^{\#}}{\partial \partial m f k_l} P k \right\rangle + \left\langle \frac{\partial \partial v f^{\#}}{\partial \partial m f k_l} \right\rangle k \quad \vdash \left(\frac{1}{\tau} \right) u(t)^2 + \left(\frac{0}{\tau} \right) u(m_e)^2 \quad \left\langle \frac{\partial \partial f t^{\#}}{\partial \partial m f k_l} \right\rangle k \quad \#$$

$$u^{\#}_{a,\#}$$

$$u$$

$$\frac{\partial f k \#}{\partial \partial m f k_l} = U \left\langle \frac{\partial \partial v f^{\#}}{\partial \partial m f k_l} P k \right\rangle + \left\langle \frac{\partial \partial v f^{\#}}{\partial \partial m f k_l} \right\rangle k \quad \left\langle \frac{\partial \partial f t^{\#}}{\partial \partial m f k_l} \right\rangle k \quad \#$$

$$u^{\#}_{a,\#} (10)$$

continuación, se plantean las expresiones que definen la incertidumbre por repetibilidad, solución y calibración de las diferentes variables del proceso de medición.

incertidumbre por repetibilidad

incertidumbre por repetibilidad de los coeficientes de resistencia al movimiento sin corrección y condiciones de referencia $f'_{\#}$ y $f'_{\#}$ se expresa como sigue:

$$u'_{a,\#} = \sqrt{n(n-1)} * \sqrt{V f'^{\#}_{\#} - f'^{\#}_{\#} X},$$

$$u'_{a,\#} = \sqrt{n(n-1)} * \sqrt{V f'^{\#}_{\#} - f'^{\#}_{\#} X}$$

$$?AB \quad ?AB$$

n : Número de repeticiones.

$f'_{\#M}$: Coeficiente de resistencia a la rodadura sin corrección para la i-ésima repetición.

$f'_{\#M}$: Coeficiente de resistencia aerodinámica sin corrección para la i-ésima repetición.

$f_{dd'd-d}$: Coeficiente de resistencia a la rodadura promedio.

$f_{dd'd-d}$: Coeficiente de resistencia aerodinámica promedio.

culo de la incertidumbre de la medición

incertidumbre de las variables involucradas en el proceso de medición se expresa en la acción (12):

$$u(x_M)^{\#}_{a[]}: \text{Varianza estimada asociada a la variable } x_M \text{ por resolución.} \quad (12)$$

- $u(x_M)^{\#}$: Varianza estimada asociada a la variable x_M .
- $u(x_M)^{\#}_{\Pi}$: Varianza estimada asociada a la variable x_M por calibración.
- $u(x_M)^{\#}_{a[]}$: Varianza estimada asociada a la variable x_M por resolución.

A continuación, se presentan los coeficientes de sensibilidad asociados al cálculo de los coeficientes de resistencia al movimiento sin corregir f'^n y $f'^{\#}$.

Estimación de los coeficientes de sensibilidad

Los coeficientes de sensibilidad describen como la salida, y , varía respecto a los cambios en los valores de entrada $x_B, x_{\#}, \dots, x$. El cambio en la salida generado por un cambio diferencial, Δx_M , en la entrada x_M , está dado como $\Delta y_M = (\partial y / \partial x_M) \Delta x_M$. Si el cambio en la salida es generado por la incertidumbre estándar u_M de la entrada x_M , la correspondiente variación está dada por $(\partial y / \partial x_M) u(x_M)$ [13]. Las ecuaciones (13) y (14) presentan el cálculo de los coeficientes de sensibilidad.

$$f' = - \frac{\left(\sum_{MAB} \frac{y_{2P4T} - y_{\Sigma @ MAB}}{(n-1) \sum 2} \right) \left(\sum_{\Sigma @ 2vP4T} \sum_{\Sigma @ \xi v; \Psi} - \sum_{\Sigma @ 2vP4\#} \sum_{\Sigma @ \xi v; \Psi} \right)}{\sum_{MAB} \xi t^*} \quad (14)$$

incertidumbre asociada al coeficiente de resistencia sin corregir

La incertidumbre asociada a los coeficientes de resistencia a la rodadura y aerodinámica sin corregir, se expresa en las ecuaciones (15) y (16).

$$u(f') = \frac{1}{f'} \sqrt{\left(\frac{\partial f'}{\partial k} u(k) \right)^2 + \left(\frac{\partial f'}{\partial \mu} u(\mu) \right)^2 + \left(\frac{\partial f'}{\partial \rho} u(\rho) \right)^2 + \left(\frac{\partial f'}{\partial A} u(A) \right)^2 + \left(\frac{\partial f'}{\partial C_D} u(C_D) \right)^2 + \left(\frac{\partial f'}{\partial C_F} u(C_F) \right)^2} \quad (15)$$

incertidumbre asociada al coeficiente de resistencia corregido

La incertidumbre asociada al coeficiente de resistencia al movimiento corregido f' y $f_{\#}$, se expresa en las ecuaciones (17) y (18):

$$u(f') = \frac{1}{f'} \sqrt{\left(\frac{\partial f'}{\partial T} u(T) \right)^2 + \left(\frac{\partial f'}{\partial P} u(P) \right)^2 + \left(\frac{\partial f'}{\partial f_{\#}} u(f_{\#}) \right)^2 + \left(\frac{\partial f'}{\partial f''} u(f'') \right)^2 + \left(\frac{\partial f'}{\partial f'''} u(f''') \right)^2 + \left(\frac{\partial f'}{\partial f'''} u(f''') \right)^2} \quad (17)$$

$$u(f_{\#}) = \frac{1}{f_{\#}} \sqrt{\left(\frac{\partial f_{\#}}{\partial T} u(T) \right)^2 + \left(\frac{\partial f_{\#}}{\partial P} u(P) \right)^2 + \left(\frac{\partial f_{\#}}{\partial f_{\#}} u(f_{\#}) \right)^2 + \left(\frac{\partial f_{\#}}{\partial f''} u(f'') \right)^2 + \left(\frac{\partial f_{\#}}{\partial f'''} u(f''') \right)^2 + \left(\frac{\partial f_{\#}}{\partial f'''} u(f''') \right)^2} \quad (18)$$

incertidumbre por calibración y resolución de los instrumentos de medición

La incertidumbre por calibración de los instrumentos u_{M} se presenta en la Ec (19).

$$U_{\text{M}}$$

$$u_{\text{cal},M} = k_{\text{cal}}$$

- U_{cal} : Incertidumbre expandida de calibración,
- k_{cal} : Factor de cobertura por calibración.

La incertidumbre por resolución de los instrumentos análogos está dada por la ecuación (20).

$$u_{\text{anl},M} = \frac{r_{\text{anl}}}{2\sqrt{3}} \quad (2)$$

La incertidumbre por resolución de los instrumentos digitales está dada por la ecuación (21).

$$u_{\text{dig},M} = \frac{r_{\text{dig}}}{2\sqrt{3}}$$

- r_{dig} : Resolución del instrumento digital.

ANEXO 2 – Modelo de estimación de incertidumbre del consumo de combustible

La varianza combinada estimada para el consumo de combustible está dada por la ecuación (1)

$$u_c^2 = \left(\frac{\partial C}{\partial N}\right)^2 u(N)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial D}\right)^2 u(D)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial T^*}\right)^2 u(T^*)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \rho_c}\right)^2 u(\rho_c)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial m}\right)^2 u(m)^2 + 2\frac{\partial C}{\partial N} \frac{\partial C}{\partial D} u(N) u(D) + 2\frac{\partial C}{\partial N} \frac{\partial C}{\partial T^*} u(N) u(T^*) + 2\frac{\partial C}{\partial N} \frac{\partial C}{\partial \rho_c} u(N) u(\rho_c) + 2\frac{\partial C}{\partial N} \frac{\partial C}{\partial m} u(N) u(m) + 2\frac{\partial C}{\partial D} \frac{\partial C}{\partial T^*} u(D) u(T^*) + 2\frac{\partial C}{\partial D} \frac{\partial C}{\partial \rho_c} u(D) u(\rho_c) + 2\frac{\partial C}{\partial D} \frac{\partial C}{\partial m} u(D) u(m) + 2\frac{\partial C}{\partial T^*} \frac{\partial C}{\partial \rho_c} u(T^*) u(\rho_c) + 2\frac{\partial C}{\partial T^*} \frac{\partial C}{\partial m} u(T^*) u(m) + 2\frac{\partial C}{\partial \rho_c} \frac{\partial C}{\partial m} u(\rho_c) u(m)$$

donde el intervalo de confianza se expresa mediante la ecuación (2):

$$\bar{C} - U(C) \leq C \leq \bar{C} + U(C)$$

donde, $U(C)$ es la incertidumbre expandida es calculada mediante la ecuación (3):

$$U(C) = k \cdot u(C)$$

do k el factor de cobertura y $u(C)$ la incertidumbre combinada, permitiendo establecer un nivel de confianza de aproximadamente 95%, si se considera una distribución de probabilidad normal. La incertidumbre asociada a la repetibilidad u_a está dada por la Ecuación (4):

$$u_a = \frac{s_{AB}}{\sqrt{n-1}} \quad (4)$$

n : Número de repeticiones.

\bar{x}_M : Consumo de combustible para la i -ésima repetición.

\bar{x} : Consumo medio de combustible.

La incertidumbre por calibración de los instrumentos $u_{cal,M}$ se presenta en la ecuación (5):

$$u_{cal,M} = k_{cal} \cdot U_{cal}$$

U_{cal} : Incertidumbre expandida de calibración (Certificado de calibración)

k_{cal} : Factor de cobertura por calibración

La incertidumbre por resolución de los instrumentos análogos está dada por la ecuación (6).

$$U$$

$$u_{afl,M} = \frac{U_{afl}}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

La incertidumbre por resolución de los instrumentos digitales está dada por la ecuación (7).

$$a_{i,M} \frac{1}{2\sqrt{3}}$$

- r_i : Resolución del instrumento digital.

Bibliografía

- [1] Lin B, Raza MY. Energy substitution effect on transport sector of Pakistan: A trans-log production function approach. J Clean Prod 2020;251:119606. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119606>.
- [2] Ben Abdallah K, Belloumi M, De Wolf D. International comparisons of energy and environmental efficiency in the road transport sector. Energy 2015;93:2087–101. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.090>.
- [3] Xie C, Bai M, Wang X. Accessing provincial energy efficiencies in China's transport sector. Energy Policy 2018;123:525–32. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.09.032>.
- [4] Ministerio de Energía - Gobierno de Chile. Inicio | Consumo Vehicular n.d. <http://www.consumovehicular.cl/inicio#/> (accessed April 9, 2020).
- [5] Portal del consumidor de la comunidad de Madrid. Etiquetado energético de los vehículos n.d. http://www.madrid.org/cs/Satellite?c=FRAME_Contentido_FA&childpagename=PortalConsumidor%2FFrame_Contentido_FA%2FPTCS_contenidoGenerico&cid=1343066080796&p=1343064183275&pageMe=PTCS_wrapper (accessed April 9, 2020).
- [6] Ministério de Minas e Energia -Brazil. Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular - Conpet n.d. http://www.conpet.gov.br/portal/conpet/pt_br/conteudo-gerais/etiquetagem-veicular.shtml (accessed April 9, 2020).
- [7] U.S.Department of Energy - Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Find and Compare Cars n.d. <https://www.fueleconomy.gov/feg/findacar.shtml> (accessed April 9, 2020).

Samuelson, J. Association of energy tax consumer preferences of energy efficiency labels from different labelling schemes could affect consumer response to price changes. *Energy Policy* 2020;137:111181. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111181>.

Martin NPD, Bishop JDK, Choudhary R, Boies AM. Can UK passenger vehicles be designed to meet 2020 emissions targets? A novel methodology to forecast fuel consumption with uncertainty analysis. *Appl Energy* 2015;157:929–39. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.044>.

ABNT. NBR 10312 - Veículos rodoviários automotores leves - Determinação da resistência ao deslocamento por desaceleração livre em pista de rolamento e simulação em dinamômetro 2014.

Bureau of Indian Standards. Automotive vehicles - Determination of Road-Load Constants By Coast Down Test Method.

New Delhi, India: 2000.

EPA. Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle. 2014. <https://doi.org/EPA-420-F-14-040a>.

Joint Committee for Guides in Metrology. GUM-Guia para a expressão da incerteza de medição. 2008.

2 CAPÍTULO DOS

Eficiencia energética para vehículos livianos en Colombia.

Energy efficiency for light vehicles in Colombia.

Juan Carlos Castillo Herrera, Álvaro Hernán Restrepo, Juan Esteban Tibaquirá.

Universidad Tecnológica de Pereira

jccastillo@utp.edu.co, arestrep@utp.edu.co, juantiba@utp.edu.co

Resumen

La creciente demanda en el consumo de energéticos en el mundo ha fomentado la búsqueda de racional y eficiente de la energía en los sectores productivos. Particularmente, el sector transporte es el principal usuario de los combustibles derivados del petróleo y el sector productivo mayores pérdidas de energía, puesto que, los motores de combustión interna ostentan una eficiencia de operación. La reducción del consumo de combustible en este sector se puede lograr usando diferentes estrategias enfocadas a la operación adecuada y al aumento de la eficiencia de los vehículos. Sin embargo, en Colombia no se cuenta con una metodología bajo pruebas dinámicas regulada que permita evaluar el consumo de combustible de los vehículos, lo que lleva a un desconocimiento sobre su rendimiento real en carretera, o el potencial que tiene una estrategia de eficiencia energética tecnológica u operacional al ser aplicada. En este sentido, el objetivo general de la investigación se centró en evaluar una estrategia de eficiencia energética en vehículos livianos del sector transporte en Colombia mediante una metodología de medición del consumo de combustible. Por lo tanto, en este documento se identifican estrategias de eficiencia energética aplicables en vehículos livianos, y se propone una metodología basada en la Regulación CFR de los Estados Unidos y COPANT para la evaluación de estrategias en ruta, la cual implementa el método gravimétrico para la medición del consumo de combustible. Como resultado, se logró

lementar la conducción eficiente en un vehículo liviano sobre la ciudad de Pereira, obteniendo res de rendimiento dentro de un rango aceptable según la desviación estándar. Adicionalmente, dentificó que la estrategia en la ciudad de Pereira puede proporcionar una reducción del sumo de combustible de hasta un 20%, y que al conducir de forma eficiente existe un aumento medio de 4,47% y 6,8% en el tiempo de ejecución de las pruebas para horas pico y horas valle ectivamente, los cual son valores poco significativos en comparación con la mejora en el limiento.

abras claves: eficiencia, vehículos, metodología, consumo de combustible.
tract.

growing energy demand in the world has fostered the need of rational and efficient energy tions across the different productive sectors. Particularly, the transport sector is the main sumer of oil derivatives and the one with most energy losses, given the low operational iency of internal combustion engines. Fuel consumption reductions in this sector, through the lementation of adequate operation practices and increasing vehicles efficiency. However, in ombia, a regulated methodology that allows the assessment of fuel consumption under dynamic has not being developed, which yields to unknown performance of vehicles under real driving ditions, or weakening the potential of implementing energy efficiency strategies. Thus, the eral objective in this research was focused on assessing a single energy efficiency strategy lied to light vehicles in the Colombian transport sector, through the measurement of fuel sumption. In this document, different energy efficiency strategies applicable to light vehicles identified, and a methodology based on the CFR 40 regulation from the United State and the PANT is proposed to evaluate on road approaches, which uses a gravimetric method to measure consumption. As result, efficient driving strategies were implemented on a light vehicle in the

Additionally, reductions up to 20% in fuel consumption were obtained by implementing the energy efficiency strategy, with average times of displacement through the city of Pereira increasing 4.47% and 6.8% during peak and off-peak hours respectively, which in comparison with performance improvement, are not significant.

Keywords: efficiency, vehicles, methodology, fuel consumption.

Introducción

El esfuerzo de los entes gubernamentales por reducir el consumo de energéticos, están orientados a impulsar hábitos conducentes al uso racional y eficiente de la energía, los cuales han reforzado mediante la implementación de programas de gestión energética, usando diferentes estrategias enfocadas a la operación adecuada y al aumento de la eficiencia de los procesos en los sectores productivos, tales como: industrial, agropecuario, comercial, público, minero y transporte [1]. Particularmente, el sector transporte ha sido reconocido mundialmente como el sector productivo con mayores pérdidas de energía, puesto que, los motores de combustión interna presentan una baja eficiencia de operación. Además, los vehículos aportan significativamente gases de efecto invernadero (GEI), gases contaminantes, ruido y calor, productos de la combustión en el tránsito urbano [2].

En la mayoría de los países, el sector transporte representa una parte sustancial del total nacional de las emisiones de CO₂, por lo tanto, cualquier intento de abordar el cambio climático, debe prestar atención a las emisiones del transporte, convirtiéndose en un punto clave para la formulación de políticas y estrategias efectivas de mitigación del cambio climático [3]. Estados Unidos, Chile, México, Brasil, Chile y algunos de la Unión Europea, evalúan el consumo energético del sector transporte para adoptar soluciones y normativas que mejoren el rendimiento de combustible en

culos. Entre las soluciones se encuentra el uso de tecnologías, combustibles más limpios, reducción eficiente y la implementación del etiquetado energético con la intención de conscientizar de manera global a los usuarios desde la compra y la operación [4]–[8]. Algunos investigadores, identifican la necesidad de medir las variables que inciden en el aumento del consumo de combustible y evaluar estrategias que pretenden mejorar el rendimiento del sector [9]. Por lo tanto, en este documento se identifican estrategias tecnológicas y operacionales que permitan mejorar la eficiencia de los vehículos, con el fin de implementar y evaluar una estrategia en Colombia. Adicionalmente, se define una metodología para la medición del consumo de combustible, con la cual se puede definir de manera precisa si la estrategia es efectiva, de esta manera, poder proporcionar información valiosa para la toma de decisiones de quienes buscan mejorar el rendimiento del transporte en Colombia.

Planteamiento del problema y justificación

Estudios relacionados con el transporte a nivel global ratifican la importancia de establecer metas para las emisiones presentes en el sector, y la necesidad de diseñar e implementar tecnologías alternativas, incluyendo biocombustibles y políticas que estructuren medidas de mitigación adecuadas [11]. Puesto que, actualmente se presenta una alta dependencia de los recursos fósiles en los vehículos, además, las emisiones contaminantes afectan directamente la salud de los habitantes y la economía de los países [12], [13]. Por lo general, las tecnologías alternativas se dividen en dos opciones; cambio de combustible y eficiencia energética. La opción de cambio de combustible podría reducir significativamente la cantidad de emisiones de GEI en un periodo de tiempo relativamente corto, aunque estará limitado por sus recursos de suministro y por la economía de escala de los vehículos que los emplean, mientras que, la opción de la eficiencia

inversión por parte de fabricantes y consumidores [14]. Por ejemplo, se identifica que los vehículos híbridos alimentados con pila de combustible (FC-HEV) y los vehículos eléctricos híbridos de pila de combustible (PHEV-FC), están siendo considerados por la industria automotriz como la tecnología que podría sustituir la convencional. Sin embargo, estas tecnologías plantean nuevos retos y se evalúan la importancia de las condiciones de conducción, los costos de inversión, la eficiencia de los vehículos y el impacto del ciclo de vida[15].

Se estima que, en Colombia, el sector transporte es el responsable del 44% del consumo energético y el principal consumidor de combustibles derivados del petróleo. Según la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) [16], este sector consume casi el 47% del diésel de todo el país y el 29% de las gasolinas, además sus emisiones presentan una trayectoria ascendente. Estudios de proyección del consumo energético del transporte realizados en Colombia, han generado preocupación y un compromiso por parte del gobierno en la reducción del consumo de combustibles y las emisiones de CO₂. Actualmente, la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) planea estrategias y actividades, con el fin de cumplir con este objetivo, entre las cuales se encuentra la Mesa de Trabajo con la Secretaría Distrital de Ambiente, donde se impulsa la introducción de tecnologías eléctricas en Bogotá, la Mesa Interministerial (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MinTransporte - UPME), donde se impulsa la incorporación de tecnologías vehiculares limpias y la Mesa de formulación (UPME, MinTransporte e ICONTEC), por la cual se realizan propuestas normativas de estándares de eficiencia energética para vehículos y la propuesta de incentivos por tecnologías eficientes en el sector transporte público por parte de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) y la UPME [17].

En resumen, la reducción en el consumo de energía del sector transporte está en una posición cla-

combustible por kilómetro recorrido, en otras palabras, aumentar su rendimiento. Las medidas para lograr esto requieren un enfoque integrado de la formulación de políticas a nivel nacional, departamental y local [18]. Por lo tanto, la implementación de estrategias de gestión energética en los vehículos del sector transporte por carretera en Colombia y su evaluación mediante una metodología de pruebas adecuada, resulta ser atractiva tanto para el país como para el usuario, ya que no sólo se puede obtener un impacto positivo sobre la matriz energética y dar soporte a las acciones o políticas energéticas y ambientales, sino también adquirir beneficios económicos para los usuarios.

Objetivos

Elaborar una estrategia de eficiencia energética en un vehículo liviano del sector transporte mediante una metodología de medición del consumo de combustible.

Identificar estrategias de eficiencia energética aplicables a vehículos livianos del sector transporte.

Definir la metodología de pruebas para la medición del consumo de combustible.

Implementar una estrategia de eficiencia energética en un vehículo liviano del sector transporte en Colombia.

Realizar un análisis comparativo de la estrategia de eficiencia energética implementada, con miras al aumento de la eficiencia en los vehículos livianos del sector transporte.

Contexto teórico

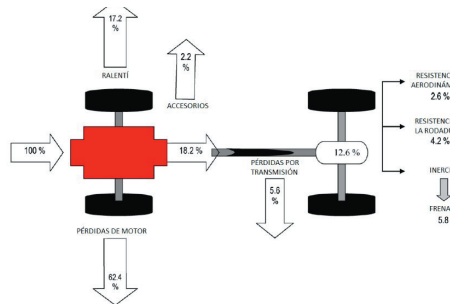
En Colombia, el estudio del consumo de energéticos en el sector transporte presenta que el 90% de la energía disponible se consume en el transporte por carretera. Esta energía se encuentra

con una participación del 37% y 40% respectivamente [19]. En el Diésel, los mayores responsables del consumo son los camiones con un 34% y los buses con un 26%. Por otro lado, las motocicletas participan con un 22%, mientras que los automóviles representan un 42% en el uso final de gasolina destinada al transporte. Con base en lo anterior, se destaca que, en lo concerniente con el consumo de gasolina, tanto las motocicletas como los automóviles son un objetivo relevante de estudio a la hora de buscar reducir el consumo de combustibles en el sector.

Específicamente, en automóviles convencionales sólo un tercio de la energía química contenida en el combustible se convierte en energía de movimiento, aquella que no se convirtió en trabajo útil, se transforma principalmente en energía térmica, la cual se libera en el medio ambiente en forma de calor residual [20]. La Figura 1 muestra el balance de energía de un vehículo tipo automóvil, se puede observar que tan sólo el 12,6 % de la energía química del combustible se transforma en energía mecánica en las ruedas. Lo anterior, se debe a que un 62,4 % de la energía se disipa a través del motor de combustión interna (en forma de calor, refrigeración y energía química), mientras que el 17,2 % se pierde o se disipa en los periodos de ralentí, el 2,2 % se disipa en el funcionamiento de los accesorios del vehículo y un 5,6% se pierde en la transmisión del movimiento (engranajes, acoples, entre otros) hasta llegar a las ruedas. Por último, la energía se utiliza para vencer las fuerzas a la aerodinámica, rodadura e inercia, o para restringir la velocidad haciendo uso del freno.

Figura 1.

Balance de energía en automóviles [20].



Eficiencia energética en vehículos

ciencia energética en vehículos

Ante las necesidades actuales de hacer uso eficiente de la energía y los compromisos a nivel mundial de disminuir los impactos negativos sobre el ambiente relacionados con los procesos de transformación energética, el sector transporte, como protagonista en cuanto al consumo en la industria energética mundial, se ve obligado a establecer estrategias que mitiguen los problemas mencionados, efectuando estudios con miras a evaluar, idear e implementar eficiencia energética en vehículos [21].

Actualmente, los esfuerzos se concentran en mejorar los factores tecnológicos en el vehículo y cambios en la operación. La revisión bibliográfica, permitió identificar tecnologías que han sido implementadas y evaluadas para aumentar el rendimiento de combustible en vehículos livianos con motores de encendido por chispa, algunas consideradas en las políticas federales de ahorro de combustible (Corporate Average Fuel Economy - CAFE) de los Estados Unidos [22]–[27]. A continuación, en la Tabla 1 se presentan algunas tecnologías evaluadas las cuales se enfocan en dar beneficios tangibles a los consumidores.

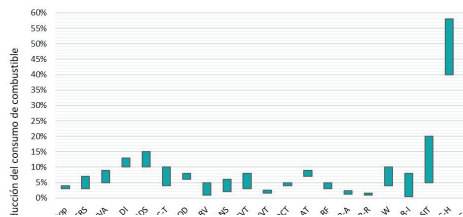
Tabla 1.

tecnologías implementadas en vehículos livianos [22]–[27].

Motor	<ul style="list-style-type: none">Arranque – Parada (Start-Stop)Arranque - Parada con freno regenerativo (Start-Stop + KERS)Válvula de actuación variable (VVA)Mejoras en el sistema de inyección directa (DI)Tiempo variable de válvula de admisión (VVT)Reducir la capacidad del motor con turbocargadores o sobrealimentación (TRBDS)Relación de compresión variable (VC-T)Desconexión selectiva de cilindros (COD)Lubricación de menor viscosidad (RV)
Transmisión	<ul style="list-style-type: none">Transmisión de doble embrague o “clutch” (DCT)Transmisiones automáticas (AT)Reducción de la fricción de componentes mecánicos (RF)
Funcionamiento y conducción	<ul style="list-style-type: none">Reducción de resistencia a la rodadura (R-R)Reducción del 10% en el peso del vehículo (R-W)Reducción de ralentí (R Ralentí)Sistemas inteligentes de transporte (SIT)

En la Figura 2, se presentan los rangos de reducción del consumo de combustible de las tecnologías expuestas en la tabla anterior, identificando que aquellas que involucran transición tecnológica influyen con mayor efectividad sobre la eficiencia del vehículo.

Figura 2.

Impactos de reducción del consumo energético por factores tecnológicos [22]–[27]

Desde el punto de vista económico, algunos estudios identifican que los compradores de vehículos están dispuestos a implementar tecnologías para el ahorro del combustible que no cedan el 76% del valor de los posibles ahorros futuros, teniendo en cuenta que las tecnologías no deben afectar negativamente la conducción, el confort, u otras propiedades [28].

Para realizar un análisis sucinto de cual estrategia tecnológica podría ser más eficaz y atractiva para su implementación, Simmons *et al* [29], identifican que el consumidor promedio puede invertir hasta \$1490 dólares para mejorar el rendimiento de combustible en un 17,3% anual. Sin embargo, el ahorro en promedio no es suficiente para cubrir los costos de implementación de la tecnología en un año, generando una reducción de interés por parte del consumidor. Por lo tanto, [29] identifican que las estrategias de reducción más eficaces deben incluir medidas de comportamiento combinadas con el desarrollo tecnológico. Las tecnologías necesitan tiempo para entrar al mercado y generar aceptación por los usuarios, en cambio, las mejoras en la operación en principio podrían ser implementadas mucho más rápido [30], [31].

Por otro lado, la conducción eficiente ha mostrado alcanzar altos resultados en la reducción del consumo de combustible y en los costos asociados al transporte. En Australia, los entrenamientos

l de 106,49 dólares australianos (AUD) [32]. Ho *et al.* obtuvieron un ahorro del 16% en el consumo de combustible en Singapur, concluyendo que aplicar esta estrategia puede generar acciones inmediatas sin el tiempo de espera para la transformación del vehículo [33].

En Colombia, aún se están planificando actividades de concientización ambiental y energética, con el fin de impulsar el uso racional y eficiente de la energía como parte habitual del comportamiento de las personas. Debido a lo anterior, la inversión económica en tecnologías para el mejoramiento del rendimiento de combustible por parte de particulares es reducida. Por lo tanto, la implementación global de la conducción eficiente; en principio, podría verse reflejado mucho más pronto en la mejora de la calidad del aire y en la reducción del consumo del combustible de los vehículos en el país, considerando que el costo de inversión es bajo y los beneficios obtenidos no sólo en tanto en el conductor (reducción del estrés, confort, economía y seguridad), como en el vehículo (mantenimiento y vida útil), aportando sobre la construcción de un transporte sostenible. En base en lo anterior, para implementar y evaluar las diferentes estrategias tecnológicas u operacionales, se tomó a consideración la disponibilidad de recursos tecnológicos presentes en el Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices de la Universidad Tecnológica de Pereira, y se decidió evaluar la conducción eficiente como estrategia de eficiencia energética en vehículos particulares.

Metodología

La revisión de las posibles estrategias de eficiencia energética que pueden ser aplicables tanto en los vehículos (nuevas tecnologías) como en el transporte (gestión y operación) identificó que el efecto o resultados obtenidos sólo puede ser determinado por un sistema de medición confiable. En Colombia, la normativa que rige el transporte Resolución 910 de 2008 únicamente reglamenta los niveles permisibles de emisiones contaminantes para fuentes móviles en prueba estática y la

norma técnica NTC 42-45 determina las emisiones de vehículos prototipo, sin describir de manera detallada procedimientos, requerimientos técnicos, personal o instrumentos para la ejecución de pruebas dinámicas.

En ese sentido, considerando que Colombia no cuenta con una normativa que regule la medición del consumo de combustible en vehículos bajo pruebas dinámicas de laboratorio o ruta, se identifica la necesidad de adoptar una metodología de pruebas internacional que sea aplicable al parque automotor colombiano. Por lo tanto, siguiendo los lineamientos de la Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT), entidad encargada de regular las normas técnicas, incluyendo ensayos vehiculares, se identifican dos metodologías destacadas en la medición del consumo de combustible: el Código Federal de Regulación - CFR 40 de los Estados Unidos y el Reglamento No 83 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa. Los países pertenecientes a la COPANT realizan pruebas a los automotores bajo estándares americanos a excepción de Argentina, quien sigue el modelo europeo. La evaluación comparativa de estas dos metodologías fue desarrollada en detalle por el Parlamento Europeo, mencionando que ambos sistemas pretenden garantizar que los vehículos cumplan con las normas pertinentes de consumo de combustible y emisiones. Sin embargo, el objetivo inicial de la legislación europea estuvo orientado a no proteger a los fabricantes de vehículos nacionales sin dañar el sistema del mercado interno. Esto condujo a un sistema de aprobaciones de tipo nacional en homologación con una supervisión permisiva. Con el tiempo, los sistemas de los Estados Unidos se interesaron menos por el comercio y más por el cumplimiento de las normativas, generando diferencias en los procesos de aprobación, los ciclos de prueba y en los dispositivos de detección de infracción. Igualmente, se denota que existen puntos clave que contribuyen a una mayor efectividad del sistema americano; el mandato de la *United States Environmental Protection (EPA)* por la protección de la salud humana y el medio ambiente.

biente, la mayor experiencia y recursos para dar cumplimiento a los casos de infracción y la claridad de la Unión Europea respecto a los casos de infracción [34].

Además, se identifica que la metodología de los Estados Unidos presenta una velocidad máxima en el ciclo FTP-75 acorde con las condiciones de operación y reglamentos del parque automotor colombiano. Así mismo, Colombia hace parte de los países pertenecientes a COPANT, los cuales su mayoría se basan en el CFR 40 de los Estados Unidos y en la norma de Brasil – NBR 7024 para la medición del consumo de combustible y las emisiones. Por lo tanto, con base en las características técnicas y la orientación Panamericana, se determina que la metodología americana es la más apropiada para la realización de ensayos a vehículos livianos en el territorio nacional.

Medición de consumo de combustible

La CFR 40 de los Estados Unidos en cuanto a la determinación del consumo de combustible de vehículos livianos, así como sus adaptaciones ABNT – NBR 7024, establecen que la medición debe realizarse mediante tres métodos: balance de carbonos, gravimétrico y volumétrico. Los resultados deben ser presentados en términos de rendimiento en [km/l] para vehículos a gasolina y en [km/m³] para vehículos a GNV [35]–[39].

Las características técnicas y tecnológicas del Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices (L.PDA) de la UTP, permiten implementar el método gravimétrico, en el cual, se mide la cantidad de masa de combustible consumida en un recorrido establecido en ruta o al realizar un ciclo de prueba en laboratorio. Trabajos paralelos realizados con el Instituto Nacional de Metrología permitieron establecer los procedimientos y métodos de cálculo del consumo y rendimiento de combustible, incluyendo el cálculo de la incertidumbre en la medición [40].

Con base en lo anterior, se definió la ec. (1), la cual expresa de manera general las variables que se requiere medir para el cálculo del rendimiento de combustible:

$$C = \frac{m}{d} \quad (1)$$

siendo,

d : distancia recorrida por el vehículo [km].

ρ_{comb} : densidad del combustible de prueba [kg/l].

m : masa consumida de combustible [kg].

$U(R)$: incertidumbre expandida asociada a la medición de las variables [km/l].

Por otro lado, el consumo de combustible es el recíproco del rendimiento, el cual puede ser calculado para las pruebas de laboratorio y ruta mediante la ec. (2):

$$C = \frac{100}{R} \quad (2)$$

donde, C es el consumo de combustible expresado en [l/100 km].

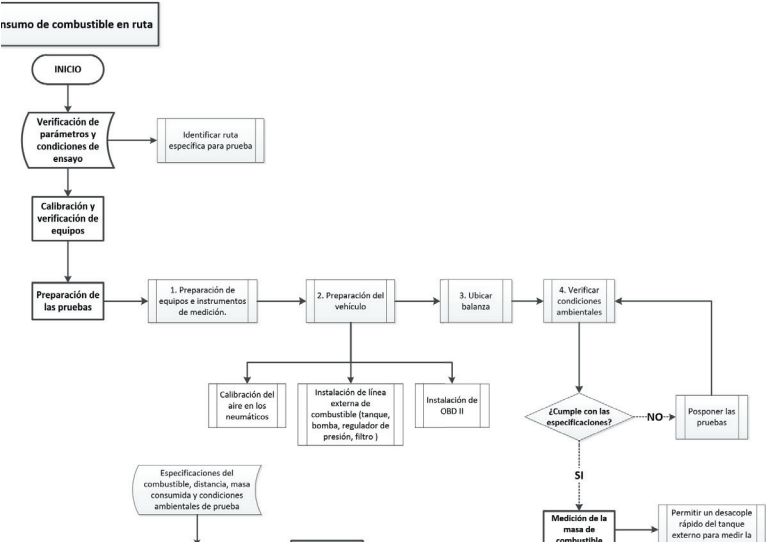
Debido a que la conducción eficiente involucra no sólo factores humanos, sino también condiciones de tráfico, topografía e infraestructura de las carreteras, es necesario evaluar dicha estrategia en ruta, por lo tanto, se desarrolló un protocolo de pruebas basado en el método gravimétrico y los estándares internacionales, el cual se presenta la Figura 3 [35], [41].

La medición de las condiciones ambientales (presión, temperatura y humedad relativa) se realiza mediante una unidad meteorológica, la densidad del combustible por medio de densímetro de gasolina, para la masa de combustible se puede usar una balanza; además, se requiere de un sistema de diagnóstico a bordo del vehículo o un OBD-II y un sistema de posicionamiento para medir segundo a segundo la distancia durante el recorrido.

Figura 3.

Figura 3.

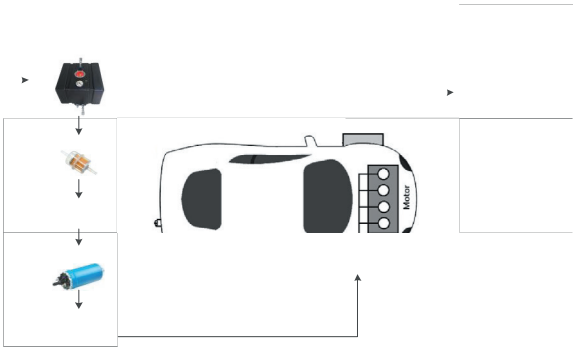
Procedimiento de pruebas de consumo de combustible en ruta



Adicionalmente, se debe simular la línea de combustible del vehículo, tal como se presenta en la figura 4, con el fin de poder extraer para cada prueba el tanque externo de combustible y realizar mediciones.

Figura 4.

Sistema externo para alimentación del motor en pruebas de ruta.

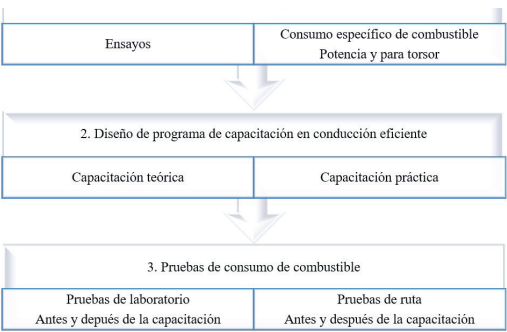


Resultados

En la búsqueda de la reducción del consumo de combustible de los vehículos livianos y de la determinación del potencial de la estrategia, se planteó implementar la conducción eficiente sobre un vehículo liviano en la ciudad de Pereira. Por lo tanto, para abordar la estrategia y realizar los ensayos se ejecutó el procedimiento ilustrado en la Figura 5.

Figura 5.

Procedimiento para la evaluación de la conducción eficiente.

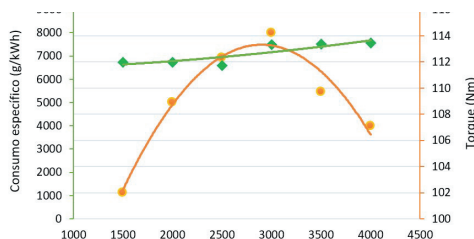


Para efectuar una conducción eficiente es importante conocer la situación actual de operación del vehículo, en este sentido haciendo uso del equipo dinamómetro de chasis – Dynapack 2000 del Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices y considerando los lineamientos de la norma SAE J1349, se realizaron pruebas de potencia, par torsor y consumo específico de combustible del vehículo a diferentes regímenes de revolución, empezando en 1500 RPM e incrementando 500 RPM hasta llegar a 4000 RPM. En los datos obtenidos, se puede identificar que el par máximo del vehículo es de 114,22 Nm, y que el vehículo a 2500 RPM presenta condiciones de operación de consumo específico mínimo con un par cercano al máximo. La Figura 6, presentan la relación entre el consumo específico de combustible y el torque del vehículo.

Figura 6.

Figura 6.

Pruebas de Consumo Específico Vs Torque.



Por lo tanto, con base en los resultados mencionados y dando un sustento práctico a la teoría de fuentes bibliográficas consultadas [42], [43], se infiere que para realizar una conducción eficiente en un vehículo liviano tipo automóvil con un motor de 1600 cm³ del sector transporte por carretera, se debe operar en un rango de revoluciones de 2000 RPM a 2500 RPM, y realizar los cambios de marcha deben realizarse a máximo 2500 RPM.

Selección de ruta

Para el desarrollo de las pruebas de conducción eficiente, se identificó una vía representativa en la ciudad de Pereira, teniendo en cuenta las rutas estudiadas para la generación del ciclo de conducción del área metropolitana centro occidente, con una modificación debida a la necesidad de medición de masa de combustible en el laboratorio y a los cambios en la infraestructura vial de la ciudad [44]. La ruta inicia en el Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices de la Universidad Tecnológica de Pereira, pasa por la calle 17 rumbo al terminal de transporte, sigue por avenida Las Américas en el tramo comprendido entre el Museo de Arte y Mercasa, se realiza el giro a la izquierda por la rotonda vía Cartago-Manizales, se devuelve por el mismo tramo, hasta llegar al Centro Comercial la 14, en donde se escoge la vía Armenia y se cruza hacia el túnel de la calle 15,

Los ensayos de rendimiento de combustible en ruta se realizaron con el apoyo de cuatro conductores (tres hombres y una mujer). De los cuales dos operaron en horas pico (7 - 8 am) (2 pm) y tres en horas valle (8 -12 am) (2 a 6 pm) de manera aleatoria, con el fin de involucrar tráfico habitual. Cada recorrido presenta una duración de aproximadamente 45 minutos y se ejecutaron siguiendo los requerimientos de condiciones ambientales de las normativas internacionales [35], [41].

Inicialmente, se realizaron un número representativo de pruebas iniciales con el fin de determinar el rendimiento de combustible promedio que presenta un conductor en la ruta seleccionada. Seguido a esto, se realizó una capacitación teórica donde se dio a conocer las prácticas a seguir durante los recorridos, y en constante monitoreo durante la ejecución de la prueba, se desarrolló el mismo número de pruebas que en la parte inicial.

Por otro lado, la conducción eficiente contiene conceptos teóricos y prácticos, que fueron incorporados en un programa de capacitación, el cual busca introducir de forma clara las prácticas a realizar e incentivar al conductor para incluirlas en su comportamiento habitual, entre los temas tratados durante la capacitación y el desarrollo de las pruebas se encuentran:

- Funcionamiento de motores, consumo de combustible y emisiones en el transporte.
- Beneficios de la conducción eficiente sobre el vehículo y el conductor. o Planificación de viaje y uso adecuado de componentes del vehículo. o Elección de marcha durante el recorrido y uso de freno. o Conducción

La Tabla 2 presenta algunos de los registros de variables y resultados obtenidos para las pruebas iniciales y después de la capacitación en conducción eficiente, cabe aclarar que para cada prueba se realizó un total de 20 ensayos.

Tabla 2.

Ensayos realizados durante la implementación de la estrategia

Ensayo	Masa consumida [kg]	Velocidad promedio [km/h]	Distancia [km]	Condiciones ambientales			Consumo de combustible [l/100km]	Rendimiento [km/l]
				Temperatura [°C]	Presión [hPa]	Humedad [%]		
3	1,60	22,3	22,3	21,1	73,6	2,18	10,22	
7	1,51	22,3	22,3	22,3	70,2	2,06	10,82	
2	1,19	22,1	27	56,6	1,61	13,71		
6	1,40	22,3	22,8	76,6	1,90	11,77		

Se realizaron pruebas estadísticas de los resultados obtenidos, con el fin de identificar si el modo empleado para la medición del consumo de combustible en ruta se encuentra dentro de una distribución aceptable. Para ello, se empleó el coeficiente de variación CV, o desviación estándar

relativa (RDS), el cual relaciona la desviación estándar con el promedio de la totalidad de las lecturas, tal como se presenta en la ec.(3) [45].

$$\%CV = \frac{S}{X} * 100 \quad (3)$$

donde,

S: es la desviación estándar de las lecturas.

X: es el promedio de la totalidad de las lecturas.

Un coeficiente de variación menor al 10%, valida los resultados obtenidos en las pruebas ejecutadas [38].

El análisis estadístico para la validación de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en ruta se presenta en la Tabla 3. En este se identifica que, aunque las pruebas de ruta están dentro del rango aceptable de desviación estándar y que la desviación estándar es menor para las pruebas iniciales, sin embargo, el criterio de validez sigue estando dentro del rango de confiabilidad, puesto que el coeficiente de variación es de 8,29%.

Tabla 3.

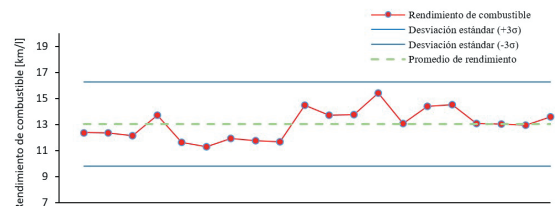
<i>Análisis estadístico en pruebas de ruta.</i> Pruebas sin conducción eficiente		Pruebas en conducción eficiente	
U(R)	0,1298 km/l	U(R)	0,1612 km/l
Rendimiento de combustible [km/l]	$10,594 \leq R \leq 10,854$	Rendimiento de combustible [km/l]	$45 \leq R \leq 13,1$

En la Figura 7 se puede observar que los datos se mantienen por dentro de los criterios permitidos de la desviación estándar; 3 veces la desviación estándar por encima del promedio y menos 3 veces la desviación estándar por debajo del promedio, para una distribución normal de probabilidad.

consumo de combustible, puesto que, a medida que los conductores practican las técnicas ejecutadas con mayor facilidad y el rendimiento del vehículo aumenta.

Figura 7.

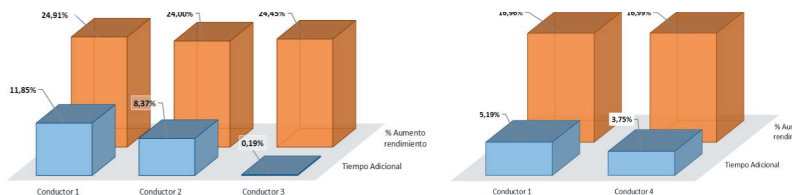
Dispersión de datos en pruebas de conducción eficiente en ruta



Con base en los resultados se puede determinar que la conducción eficiente es una estrategia viable para la reducción del consumo de combustible en los vehículos livianos. En la Figura 8, se puede observar el porcentaje de aumento del rendimiento de combustible y el contraste con el porcentaje de tiempo adicional invertido en la realización de las pruebas.

- a) Conducción eficiente en horas valle.
- b) Conducción eficiente en horas pico.

Resultados de conducción eficiente en la ciudad de Pereira



Se puede determinar que aun cuando se debe adicionar un tiempo para realizar conducción eficiente, este es mínimo en comparación con la notoria reducción del consumo de combustible. Además, se evidencia que el aprovechamiento de las técnicas va directamente relacionado con la persona que las practica, tal como lo demuestra el conductor 3 en la ejecución de las pruebas. Por lo tanto, se puede concluir que la conducción eficiente en horas valle, el cual obtuvo el mismo porcentaje de aumento del rendimiento sin inversión de tiempo adicional. Además, los ensayos realizados indican que el efecto del tráfico en horas pico es relevante al implementar conducción eficiente, puesto que, se presenta un 7,48% de reducción del rendimiento del combustible en comparación con los ensayos realizados en horas valle.

Conclusiones

A continuación, se presentan las conclusiones encontradas en la ejecución del proyecto:

- Durante la revisión del estado del arte se identificó que existen estrategias tecnológicas y operacionales que pueden ser aplicables en vehículos livianos para mejorar la eficiencia energética. De igual forma, se identificó la metodología de consumo de combustible y el método de medición, que permiten evaluar las estrategias implementadas en ruta y definir de forma segura si la estrategia es efectiva considerando factores reales de las carreteras. Por lo tanto, permite identificar que estrategias pueden ser implementadas a gran escala en

Colombia para impactar positivamente sobre la reducción del consumo de combustible y las emisiones vehiculares, lo cual aporta a las metas planteadas en los pactos gubernamentales.

Se identificó la conducción eficiente como una de las estrategias de eficiencia energética viable para ser implementada en el territorio colombiano, puesto que, su costo-beneficio es bajo, permite la reducción en el consumo de combustible, la tasa de accidentalidad y las emisiones de CO₂, adicionalmente es una estrategia cómoda para aplicar, entender y con amplios canales de información.

Se definieron las especificaciones técnicas de los equipos, y el protocolo de pruebas para llevar a cabo la implementación de la medición del consumo de combustible en ruta bajo el método gravimétrico, tomando en consideración que las capacidades tecnológicas y de infraestructura de los laboratorios en Colombia favorecen su implementación. Adicionalmente, se establecieron los criterios de aseguramiento metrológico necesarios para garantizar la repetibilidad y confiabilidad en los resultados en la realización de pruebas de ruta.

Se determinó que la implementación de la conducción eficiente como estrategia de eficiencia energética en vehículos livianos permite reducir en el consumo de combustible. Las pruebas realizadas bajo las características de operación de los vehículos en

Pereira, se obtuvo una reducción general de hasta un 20 % en el consumo. Conducir de forma eficiente puede aumentar de 4,47% a 6,8% el tiempo de un recorrido en la ciudad. Sin embargo, aun cuando se debe adicionar un tiempo para realizar conducción eficiente, este es mínimo en comparación con el notorio aumento del rendimiento de combustible, además, se evidencia que el aprovechamiento de las prácticas va directamente relacionado con la persona que las ejecuta.

Bibliografía

- [1] Icontec International, “Norma Técnica Colombiana - NTC ISO 50001,” no. 571. 2011.
- [2] L. Michaelis and O. Davidson, “GHG mitigation in the transport sector,” *Energy Policy* vol. 24, no. 10–11, pp. 969–984, Oct. 1996.
- [3] G. R. Timilsina and A. Shrestha, “Transport sector CO2 emissions growth in Asia: Underlying factors and policy options,” *Energy Policy*, vol. 37, no. 11, pp. 4523–4539, Nov. 2009.
- [4] CTS Embarq México, “Documento base para la elaboración de la “Estrategia de Transición para promover el uso de Tecnologías y Combustibles más limpios” en el ten de ahorro de energía en transporte.” 2015.
- [5] Agencia Chilena de Eficiencia Energética, “Guía de Conducción Eficiente Vehículos particulares.” 2013.
- [6] J. B. Mariano and Superintendencia de Planificación e Investigación, “Eficiencia Energética en Brasil,” 2012.
- [7] C. Gavilán Labra and Agencia Chilena de Eficiencia Energética, “Etiquetado vehicular Chile y otras medidas de eficiencia energética para vehículos particulares,” 2013.
- [8] U.S. Department of Energy - Energy Efficiency and Renewable Energy, “Learn More About the Fuel Economy Label for Gasoline Vehicles.” [Online]. Available: <https://www.fueleconomy.gov/feg/label/learn-more-gasoline-label.shtml>. [Accessed: 26-Dec-2016].
- [9] M. Andrejić, N. Bojović, and M. Kilibarda, “A framework for measuring transport efficiency in distribution centers,” *Transp. Policy*, vol. 45, pp. 99–106, Jan. 2016.
- [10] J. Wu, Q. Zhu, J. Chu, H. Liu, and L. Liang, “Measuring energy and environment efficiency of transportation systems in China based on a parallel DEA approach,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, Sep 2015.

vehicles in Lebanon. Policy options,

CO2 emissions reduction and welfare gains,” *Transp. Policy*, vol. 42, pp. 144–155, Aug. 2015.

F. B. Chaaban, I. Nuwayhid, and S. Djoundourian, “A study of social and economic implications of mobile sources on

air quality in Lebanon,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 6, no. 5, pp. 347–355, Sep. 2001.

A. Singh, S. Gangopadhyay, P. K. Nanda, S. Bhattacharya, C. Sharma, and C. Bhan, “Trends of greenhouse gas

emissions from the road transport sector in India,” *Sci. Total Environ.*, vol. 390, no. 1, pp. 124–31, Feb. 2008.

J. Pongthanaisawan and C. Sorapipatana, “Greenhouse gas emissions from Thailand’s transport sector: Trends and

mitigation options,” *Appl. Energy*, vol. 101, pp. 288–298, Jan. 2013.

J. P. Ribau, C. M. Silva, and J. M. C. Sousa, “Efficiency, cost and life cycle CO2 optimization of fuel cell hybrid and

plug-in hybrid urban buses,” *Appl. Energy*, vol. 129, pp. 320–335, Sep. 2014.

Á. I. Cadena, O. V. González, O. Báez, and Unidad de Planeacion Minero Energética, “Eficiencia Energética En

Colombia Estrategias y metas,” 2014.

Unidad de Planeación Minero-Energética, “EFICIENCIA ENERGÉTICA Y TRANSPORTE EN COLOMBIA,” 2015.

I. F. Okafor, G. O. Unachukwu, and A. O. Odukwe, “Measuring energy efficiency of the public passenger road transport

vehicles in Nigeria,” *Transp. Policy*, vol. 35, pp. 319–325, 2014.

Indicativo De Eficiencia

Energética 2017 - 2022,” p. 157, 2017.

- [20] T. M. I. Mahlia, S. Tohno, and T. Tezuka, “A review on fuel economy test procedure for automobiles: Implementation possibilities in Malaysia and lessons for other countries,” *Renew. Sustain. Energy Rev.* vol. 16, no. 6, pp. 4029–4046, 2012.
- [21] V. Ş. Ediger and Ü. Çamdali, “Energy and exergy efficiencies in Turkish transportation sector, 1988-2004,” *Energy Policy*, vol. 35, no. 2, pp. 1238–1244, 2007.
- [22] G. Ombach and J. Junak, “Weight and efficiency optimization of auxiliary drives used in automobile,” *19th Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2010*, 2010.
- [23] S. Kobayashi, S. Plotkin, and S. K. Ribeiro, “Energy efficiency technologies for road vehicles,” *Energy Effic.*, vol. 2, no. 2, pp. 125–137, 2009.
- [24] HM Treasury, *The King Review of low-carbon cars - Part I: the potential for CO2 reduction*, no. November. 2007.
- [25] G. Fontaras and Z. Samaras, “On the way to 130 g CO2/km-Estimating the future characteristics of the average European passenger car,” *Energy Policy*, vol. 38, no. 4, pp. 1826–1833, 2010.
- [26] J. Pandazis and A. Winder, “Study of Intelligent Transport Systems for reducing CO2 emissions for passenger cars,” *Eur. Road Transp. Telemat. Implement. Coord. Organ.*, 1, no. 9, p. 49, 2015.
- [27] R. Improvements, *Making Cars More Fuel Efficient: Technology for real improvement on the road*, vol. 9789282103. 2005.

G. Helfand *et al.*, “Searching for hidden costs: A technology-based approach to the energy efficiency gap in light-duty

vehicles,” *Energy Policy*, vol. 98, pp. 590–606, 2016.

R. A. Simmons, G. M. Shaver, W. E. Tyner, and S. V. Garimella, “A benefit-cost assessment of new vehicle

technologies and fuel economy in the U.S. market,” *Appl. Energy*, vol. 157, pp. 940–952, 2015.

S. Skippon, S. Veeraraghavan, H. Ma, P. Gadd, and N. Tait, “Combining technology development and behaviour change

to meet CO₂ cumulative emission budgets for road transport: Case studies for the USA and Europe,” *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 46, no. 9, pp. 1405–1423, 2012.

S. Birrell, J. Taylor, A. McGordon, J. Son, and P. Jennings, “Analysis of three independent real-world driving studies: A

data driven and expert analysis approach to determining parameters affecting fuel economy,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 33, pp. 74–86, 2014.

I. Jeffreys, G. Graves, and M. Roth, “Evaluation of eco-driving training for vehicle fuel use and emission reduction: A

case study in Australia,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, 2016.

S. H. Ho, Y. D. Wong, and V. W. C. Chang, “What can eco-driving do for sustainable road transport? Perspectives from

a city (Singapore) eco-driving programme,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 14, no. 1, pp. 82–88, 2015.

M. Nesbit *et al.*, “Comparative Study on the differences between the EU and US legislation on emissions in the

automotive sector,” *Eur. Parliam. Com.*, 2016.

Asociacao Brasileira de NormasTécnicas, “ABNT NBR 7024 - Veículos rodoviários automotores leves - Medicao do consumo de combustivel - Método de ensaio.” pp. 1–8, 201

consumo de combustível - Método de ensaio.” pp. 1–8, 2010.

- [36] Organismos Nacionales de Normalización (ONN) de las Américas, “COPANT - Comi Panamericana de Normas Técnicas.” [Online]. Available: <http://www.copant.org/index.php/es/>. [Accessed: 18-Jul-2017].
- [37] U.S. Government Publishing Office, “CFR 40 — Code of Federal Regulations.” [Online]. Available: https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?tpl=/ecfrbrowse/Title40/40tab_02.tpl. [Accessed: 18-Jul-2017].
- [38] ABNT, “NBR 10312 - Veículos rodoviários automotores leves - Determinação da resistência ao deslocamento por desaceleração livre em pista de rolamento e simulação em dinamômetro,” 2014.
- [39] M. Kisan, S. Sangathan, J. Nehru, and S. G. Pitroda, “Automotive Vehicles - Determination of Road-Load Constants by coast Down Test Method,” 2000.
- [40] J. C. López *et al.*, “Development of a fuel consumption measurement methodology for light duty vehicles in Colombia, based on metrological principles,” *30th Int. Conf. Effic. Cost, Optim. Simul. Environ. Impact Energy Syst. ECOS 2017*, vol. 87, no. 212, pp. 47–56, 2017.
- [41] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “ABNT NBR 6601 - Veículos rodoviários automotores leves — Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono y material particulado no gás de escape.” 2005.
- [42] Senter Novem and IDAE - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, “L. Conducción Eficiente.”
- [43] IDAE - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía and Ministerio de Industria Comercio, “Eficiencia en el Transporte: Manual de conducción Eficiente,” 2006.
- [44] A. Hurtado Gómez, “Desarrollo de ciclos de conducción para el área metropolitana de Bogotá - Amco,” 2014.
- [45] S. Sandoval, “Guía Técnica: Validación de métodos y determinación de la incertidumbre de la medición,” *Zhurnal Eksp. i Teor. Fiz.*, p. 66, 2010.

3

CAPÍTULO
TRES

Caracterización De Señales Electrocardiográficas Para Identificación De Arritmias Cardiacas

Characterization of Electrocardiographic Signals for Identification of Cardiac Arrhythmias

Ana María López Echeverry, Jovany Bedoya Guapacha, Sebastián López Flórez

Universidad Tecnológica de Pereira

anamayi@utp.edu.co, jovan@utp.edu.co, sebastianlopezflorez@utp.edu.co

Resumen

Las enfermedades cardiovasculares son unas de las principales causas de muerte a nivel mundial y entre estas enfermedades se encuentran las arritmias cardíacas. El proyecto tiene como propósito identificar con la ayuda de un módulo de análisis inteligente diferentes tipos de arritmias permitan un diagnóstico oportuno por parte de los médicos tratantes. En este proyecto fue posible la caracterización de las señales tomadas por monitores ambulatorios externos, por medio de un módulo de procesamiento de datos que hace uso de la TW (Transformada Wavelet) y filtros digitales para la extracción y análisis de patrones naturales que se encuentran dentro de la electrofisiología del corazón como son el complejo QRS, el segmento PR, el segmento QR, el segmento RS y el segmento ST, para luego pasar por una etapa de clasificación con base en máquinas de soporte vectorial. A través del proyecto fue posible demostrar que, mediante el método propuesto, se puede generar una herramienta automática de detección de arritmias cardíacas como un elemento de ayuda para la toma de decisiones de remisión de pacientes a valoración por médico especialista.

Palabras claves: Arritmia cardíaca, transformada wavelet, filtros, máquinas de soporte vectorial

Abstract

Cardiovascular diseases are one of the main causes of death worldwide, and among these diseases are cardiac arrhythmias. The purpose of the project is to identify with the help of an intelligent analysis module different types of arrhythmias that allow a timely diagnosis by treating doctors. In this project it was possible to characterize the signals taken by external ambulatory monitors means of a data processing module that makes use of the TW (Wavelet Transform) and digital filters for the extraction and analysis of natural patterns found within of the electrophysiology of the heart such as the QRS complex, the PR segment, the QR segment, the RS segment and the ST segment.

ment, and then go through a classification stage based on vector support machines. Through the ject, it was possible to demonstrate that using the proposed model, an automatic cardiac rythmia detection tool can be generated as an aid to decision-making regarding the referral of ents for evaluation by the specialist physician.

words: Cardiac arrhythmias, Wavelet Transform, filters, vector support machines.

roducción

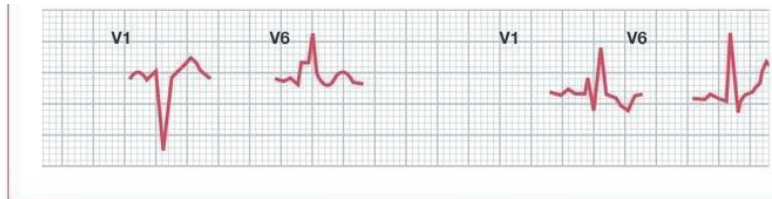
La muerte súbita es una muerte natural, inesperada y rápida que se presenta dentro de la primera a después del inicio de síntomas [27]. La causa más común de la muerte súbita son las rmedades Cardiovasculares (ECV), que además se constituyen en una de las principales causas muerte en todo el mundo. En 2012, la Organización Mundial de la Salud (OMS) registró 17,5 lones de muertes por ECV, que representan el 31 % de todas las muertes registradas en el mundo De acuerdo al segundo informe del observatorio nacional de salud, que incluyó en el análisis a mortalidad el período comprendido entre los años 1998 y 2011, la principal causa de muerte vel nacional es la enfermedad isquémica cardíaca [28]. Esto evidencia la necesidad de contar sistema de diagnóstico oportuno que permita la inclusión de los pacientes con problemas liacos en las rutas de atención integral.

Las diferentes características presentes en la señal ECG están asociadas con tipos específicos de . Por ejemplo, El bloqueo de rama izquierda (LBBB) se diagnostica mediante la morfología S distinta en las derivaciones I, aVL, V1, V2, V5 y V6, mientras que el bloqueo de rama derecha (RBBB) se diagnostica mediante el patrón rsR' en V1 y V2 [29]. Esto se puede observar en la gen 1, donde en el bloqueo de rama izquierda (LBBB), el patrón se detecta mejor en V6 donde un patrón "M", mientras que en V1 hay un patrón "W"[32]. Adicionalmente, en el bloqueo de

rama derecha (RBBB), el patrón se detecta mejor en V1 donde hay un complejo RSR, mientras en V6 hay un complejo QRS. Para reconocer de manera confiable estas características complejas de ECG asociadas con AC, es posible capacitar un sistema dotado de inteligencia. De hecho, estudios han demostrado que los internistas o cardiólogos a veces diagnostican erróneamente tipos de AC [30]. El crecimiento significativo del número de exámenes de ECG, que aumenta la carga de trabajo de los médicos, exacerba el problema. Esta situación podría aliviarse mediante el desarrollo de algoritmos informáticos capaces de producir diagnósticos precisos y automáticos para ayudar a los médicos. Aunque tal tarea sería difícil debido a la gran variación en las características geométricas y fisiológicas de las señales de ECG [31, 10].

Figura 1.

Patrones de electrocardiograma de bloqueo de rama izquierda y bloqueo de rama derecha.



Fuente: [32]

El proyecto se inició con un estudio a nivel de estado del arte partiendo del problema identificando diferentes técnicas y herramientas de solución, se continuó con la etapa de diseño de los módulos de caracterización, clasificación y visualización como se muestra en la imagen 2. Esto permite tener una primera aproximación a los componentes del sistema, para posteriormente pasar a la etapa de implementación y validación de funcionalidad. Por último, se realizó la validación de la solución mediante dos conjuntos de datos de prueba, uno a partir de la base de datos MIT.

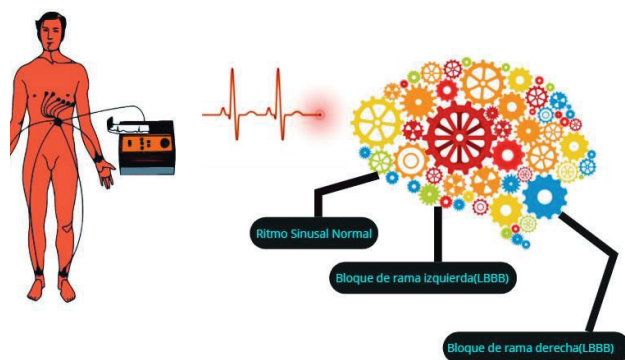
, el segundo consistió en una base de 10 pacientes entregada por el médico especialista que realizó el desarrollo del proyecto, permitiendo esta segunda instancia de validación contar con mejores resultados a partir de datos de la región.

Los resultados obtenidos por medio de la aplicación prototipo generada con el sistema integrado permitió la clasificación de las señales bloqueo de rama derecha (RBBB), bloqueo de rama izquierda (LBBB) y latido NORMAL.

Con base en los resultados, se valida la hipótesis planteada, donde el sistema fue capaz de identificar diferentes arritmias a partir de una arquitectura simple identificando las arritmias validadas por el médico que más afectaban la región.

Figura 2.

Esquema general del proceso de prediagnóstico.



Nota: Elaboración propia.

Planteamiento del problema y justificación

En Colombia, la primera causa de muerte es la enfermedad coronaria en 25 departamentos, segunda causa en 7 departamentos (Arauca, Valle del Cauca, Guaviare, Cauca, La Guajira, Putumayo y Guainía) [2]. Las arritmias son una causa importante de morbilidad y mortalidad, de las cuales se destacan las taquiarritmias ventriculares agudas que son la mayor causa de muertes súbitas, a menudo provocadas por eventos coronarios agudos. Éstas pueden presentarse en personas sin enfermedad cardíaca conocida o en asociación con cardiopatía estructural. [4]. La Política de Atención Integral en Salud –PAIS adoptada mediante la resolución 429 de 2016, establece de entre sus principios para la atención en salud, el compromiso con la persona, al considerar el contexto de su entorno y cultura con un enfoque diferencial territorial bien sea urbano, de alta ruralidad, o de baja rural dispersa, estableciendo un reto para las entidades prestadoras de servicios de salud, al tener que garantizar procesos de atención primaria en sitios alejados de los grandes centros urbanos. Sin embargo, los pacientes en zonas apartadas no cuentan con fácil acceso a profesionales especializados en las zonas de residencia. Es por ello que se hace necesario generar soluciones que ayuden a brindar acceso a procesos de diagnóstico oportuno a las personas sin importar su ubicación física, o qué tan alejados se encuentren de los centros urbanos con servicios de mayor nivel.

Establecen los autores en [3] que la clasificación automática de latidos cardíacos se ha originado en ocasiones a partir de métodos de procesamiento de señales del complejo QRS, teniendo en cuenta que este complejo QRS representa la característica más pronunciada de una señal ECG. Las señales P, Q, R, S y T se refieren a diferentes ubicaciones y frecuencias de la actividad cardíaca y les brinda a los médicos pistas para detectar daño [5].

Adicionalmente, mediante la transformada discreta de wavelet (TDW) es posible realizar una composición adaptativa de tiempo-frecuencia en un patrón correspondiente, lo que permite ver patrones naturales que se encuentran dentro de la electrofisiología del corazón como lo son el complejo QRS, el segmento PR, el segmento QR, el segmento RS y el segmento ST según dicen los autores en [6]. Teniendo en cuenta que estos patrones se ven modificados por el ruido proveniente de la muestra ECG por medio de la filtración es posible eliminar las señales no deseadas que modifican el patrón de comportamiento de la señal original. [7]

La razón principal de este estudio es aportar a los profesionales en el área una herramienta de apoyo para el diagnóstico de enfermedades cardíacas con base en el análisis del electrocardiograma. Las tecnologías de la información y las comunicaciones aplicadas a la salud posibilitan un gran número de soluciones a las problemáticas de este sector, brindando opciones para optimizar los servicios de salud en países en vía de desarrollo como el nuestro. Se busca implementar estrategias que beneficien un gran número de integrantes de la sociedad por medio de sistemas sencillos económicamente, de fácil aceptación y buenos resultados, teniendo en cuenta las condiciones sociales y económicas del país.

Objetivos

Desarrollar un sistema de diagnóstico automático que apoye la detección de algunas enfermedades del corazón, mediante la caracterización y clasificación de señales por medio de herramientas matemáticas como la transformada Wavelet y de algoritmos de clasificación inteligentes.

características de la señal electrocardiográfica y sobre los métodos matemáticos para la identificación y análisis de señales biológicas.

Diseñar un módulo de caracterización de las ondas de señal que hacen parte del electrocardiogr

Diseñar un módulo de clasificación a partir de las características de la señal ECG que pe
identificar tanto arritmias como señales normales.

Desarrollar un prototipo de aplicación web que integre los módulos de caracterización y
clasificación que permita la visualización del diagnóstico a partir de la señal ECG de entrada.

Referente teórico

La solución de problemáticas de diferentes sectores requiere una mirada interdisciplinaria, por esto que en este proyecto se abordan elementos de la salud, específicamente del corazón posibilidad de identificar enfermedades cardiovasculares a partir del análisis de señales, para lo se requiere integrar conocimientos de las áreas de ingeniería y salud. Se describen algunos conceptos que validan teóricamente la posibilidad de generar diagnósticos a partir del análisis de señales.

El aparato circulatorio tiene como órgano principal el corazón, es un órgano muscular hueco y contráctil, dividido en 4 cavidades por medio de tabiques interiores, internamente puede divi

ventrículos (cavidades inferiores) y aurículas (cavidades superiores). Existen una serie de válvulas que controlan el flujo sanguíneo en el corazón, estas están ubicadas en la unión entre el ventrículo y las arterias de salida (unión auriculoventricular), para el lado izquierdo corresponde a las válvulas mitral y aórtica, y en el lado derecho están las válvulas tricúspides y la pulmonar. [8]

La electrocardiografía es el estudio de la actividad eléctrica del corazón que representa los cambios en el potencial de acción ocurridos durante el ciclo cardíaco; estos cambios son descritos por una serie de vectores que indican la dirección de la despolarización celular en cada una de las cavidades cardíacas; por ello, el análisis de la secuencia de propagación del impulso hace posible la deducción del comportamiento electrofisiológico de las estructuras del corazón y de posibles anomalías. El registro de dicha actividad se ve representado en una gráfica que muestra una serie de deflexiones en la medida en la que el impulso cardíaco se propaga, pudiendo ser obtenida a través de aparatos llamados electrocardiógrafos, los cuales, son conectados al paciente mediante cables unidos a electrodos de superficie ubicados sobre el cuerpo según normas establecidas llamadas derivaciones. La señal electrocardiográfica puede interpretarse de acuerdo a la derivación con la que es captada, ya que cada una de estas, representa la lectura de la magnitud y dirección de los vectores del potencial de acción desde distintos lugares de referencia [9].

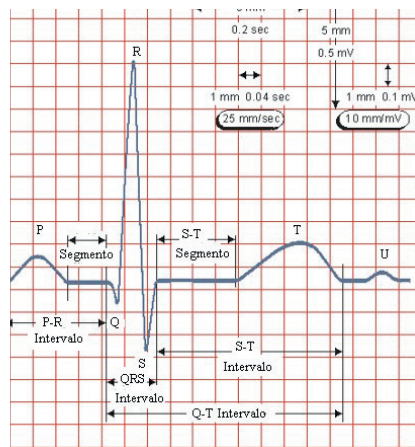
Un electrocardiograma (ECG - EKG) es un examen que muestra por medio de una gráfica de la actividad eléctrica del corazón, la cual es adquirida a través del electrocardiógrafo. El ECG se utiliza básicamente para diagnosticar enfermedades cardíacas como infartos, medir el ritmo y la regularidad de los latidos, así como la posición y el tamaño de las cámaras cardíacas, la señal se obtiene a través de una serie de electrodos ubicados en diferentes partes del cuerpo llamadas derivaciones, por lo tanto la causa principal para la realización de un electrocardiograma se debe a

que este examen es de gran utilidad para determinar si una persona padece de dolencias cardíacas o no [10][11].

Durante las fases de despolarización y polarización del corazón, se registran en el ECG normal una serie de ondas como son la P, el complejo QRS, la onda T, la onda U, los segmentos P-R y T y el intervalo Q-T [12][13].

Figura 3.

Señal Electromiográfica



Fuente: www.fi.uba.ar/materias/6643/u3_cardiologia.pdf. (2006)

La imagen 3 muestra las diferentes ondas. La onda P: es una pequeña onda que corresponde a la despolarización de las aurículas (Contracción o sístole auricular), la anchura de una onda determina el tiempo que demora un impulso en pasar del nodo SA al nodo AV con una duración máxima de 0,10s.

entrículos (despolarización ventricular). Es el componente más característico del ECG.

El complejo QRS inicia con una onda descendente, continúa con una onda rápida triangular ascendente y termina con una pequeña deflexión. Está constituido por la sucesión de las ondas Q, R, S. Duración 60-100ms.

Wnda Q: representa la deflexión negativa inicial resultante de la despolarización ventricular, que precede a la onda R, con una duración habitual de 40ms.

Wnda R: es la primera deflexión positiva que aparece durante la despolarización ventricular.

Wnda S: es la segunda deflexión negativa que se obtiene durante la despolarización ventricular. En algunas ocasiones puede no visualizarse.

Wnda T: es la onda positiva ascendente y suave que aparece después del complejo QRS y representa la repolarización ventricular (relajación o diástole ventricular). Tiene una duración de típicamente 200ms o menos.

Wnda U: Esta onda no es constante, tiene una dirección positiva, aunque puede ser negativa, su

Segmento S-T: representa el intervalo entre el final del complejo QRS y el inicio de la onda T. Este segmento se asocia con el proceso de recuperación o repolarización ventricular. Duración típica: 240ms.

Segmento P-R: corresponde a la línea isoelectrica definida desde el comienzo de la onda P hasta la deflexión inicial del complejo QRS. La duración normal de este segmento está entre los 0,12s y los 0,21s.

Intervalo R-R: equivale a la distancia entre dos ondas R sucesivas, con una duración típica entre 600-1000ms.

Intervalo Q-T: es la distancia desde el inicio de la onda Q hasta el final de la onda T. Representa el principio de la despolarización ventricular hasta el final de la repolarización ventricular. El intervalo Q-T depende de la frecuencia cardíaca. Duración típica: 300-400ms.

Intervalo P-P: es la distancia entre dos ondas P sucesivas; si el ritmo es regular, debe medirse el mismo que el intervalo RR.

Intervalo P-R: mide la distancia desde el comienzo de la onda P hasta el inicio del complejo QRS. Determina el tiempo en el que el impulso eléctrico está viajando del nodo SA, (a través del nodo AV) hacia los ventrículos. Duración típica: 120-200ms.

Las arritmias cardíacas se definen como la irregularidad en el ritmo natural del corazón. Esto se refiere a cualquier cambio de lugar en la generación del pulso eléctrico del corazón. Pueden ser

triculares [14].

Las arritmias supraventriculares se producen generalmente en las aurículas, mientras que las arritmias ventriculares se producen en los ventrículos. Las arritmias también se definen según la frecuencia de los latidos [15]:

- La bradicardia: es la disminución de la frecuencia cardíaca por debajo de 60 lpm.
- Taquicardia: es el aumento de la frecuencia cardíaca por encima de 100 lpm.

Existen estudios que presentan resúmenes de los métodos de procesamiento de señales propuestos para el filtrado, extracción de características y clasificación de arritmias de una señal ECG desde el año 1979 hasta el año 2014, dentro de los que se encuentran filtros digitales, análisis de amplitud, ancho de señales y uso de filtros pasa banda y digitales con respecto al método Okada, transformada Wavelet Dyadic, Wavelet spline cuadrática con clasificación por inferencia con lógica difusa, Wavelet sombrero mejicano, la función wavelet compleja de Morlet, redes neuronales, wavelet spline cuadrática, wavelet Haar, entre otras, denotándose que el análisis mediante wavelet es el más usado en el ámbito investigativo hasta ahora para el análisis de señales ECG.[6]

La transformada Wavelet es una herramienta matemática usada en múltiples aplicaciones en el procesamiento de señales y en Control de Procesos y detección de anomalías sintomáticas en

de una señal, bloques que son generados desde una única función fija denominada wavelet $\psi(t)$ [17], mediante operaciones de traslación y dilatación, a través de la siguiente expresión:

$$x-b$$

$$\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a, b \in \mathbb{R}, \quad a \neq 0$$

Donde, a y b son escalares reales, a permite hacer las dilataciones y contracciones de la s y b permite cambiar la posición de la señal en el tiempo. La transformada wavelet proporciona localización tiempo-frecuencia adaptativa. Si se tiene un nivel de escala baja se obtiene una buena resolución en tiempo, pero si se tiene un nivel de escala grande se obtiene buena resolución en frecuencia. Las wavelets están clasificadas por familias, donde el uso de una de ellas depende de la aplicación y las características a extraer, algunas familias son: Daubechies, Symlets, Biortogonales.

En el procesamiento de las señales también se usan filtros, estos permiten la discriminación de señales con relación a su contenido espectral, es decir, son sistemas que están diseñados para transmitir o bloquear señales dentro de un cierto rango o intervalo de frecuencias. Así, el rango de frecuencias dentro del cual las señales pasan inalteradas se conoce como banda de paso, y el intervalo de frecuencias donde las señales son bloqueadas se le llama banda de rechazo. Los filtros pueden estar conformados por componentes puramente pasivos (resistencias, capacitores e inductores), activos (con amplificadores operacionales) o digitales (implementados con circuitos digitales o programados en una computadora). Existen dos grandes divisiones dentro de

mas: los filtros analógicos que son empleados para tratamiento de señales continuas en el tiempo, y los filtros digitales que trabajan con señales discretas en el dominio del tiempo [18] [19].

Para la etapa de clasificación es necesario considerar que existen algoritmos que permiten encontrar patrones y luego usar estos para resolver nuevos problemas. Existen dos grandes grupos de técnicas para este aprendizaje, aprendizaje supervisado que corresponde a las tareas de clasificación y regresión y, aprendizaje no supervisado que corresponde a tareas de agrupamientos o correlaciones. Los algoritmos de aprendizaje supervisado [20] son usados como técnica de aprendizaje de patrones y disminución de la dimensionalidad. Requieren un etiquetado de cada uno de los patrones de entrada. El objetivo de los algoritmos de aprendizaje supervisado es construir una función a partir de datos de aprendizaje y transformarlos en salidas deseadas. Los algoritmos de aprendizaje no supervisado [21] son unas técnicas de aprendizaje automático en el cual un modelo es ajustado a las observaciones. Se diferencian del aprendizaje supervisado en que no hay aprendizaje a priori.

Las máquinas de soporte vectorial SVM pertenecen al aprendizaje supervisado, estas construyen un hiperplano para discriminar entre diferentes tipos de clases y tiende a maximizar el margen y evitar cualquier punto de datos mal clasificado en este margen. Se pueden aplicar múltiples funciones de kernel: kernel polinomial, kernel de la función de base radial y Sigmoid [5].

Desde un enfoque bayesiano, el problema de clasificación supervisada consiste en asignar a un objeto descrito por un conjunto de atributos o características, X_1, X_2, \dots, X_n , a una de m clases posibles, c_1, c_2, \dots, c_m , tal que la probabilidad de la clase dados los atributos se maximiza[22]:

La formulación del clasificador bayesiano se basa en utilizar la regla de Bayes (compacta) para calcular la probabilidad posterior de una clase a partir de sus atributos.

$$P(C|X) = P(C)P(X|C)/P(x)$$

El algoritmo K vecinos más cercanos (KNN, por sus siglas en inglés) es un método simple, pero a la vez de alto rendimiento en clasificación. Este se ha usado para diagnosticar algunas enfermedades del corazón de forma automática. El algoritmo KNN clasifica un nuevo vector aplicando un conjunto de entrenamiento sin necesidad de aprender parámetros, a diferencia de otros algoritmos que aplicando un conjunto de entrenamiento aprende algunos parámetros y luego utilizando estos últimos clasifica un nuevo vector [23]

Los autores en [24] proponen un sistema AIoT (Artificial IoT) que incluye un dispositivo frontend, una interfaz de usuario de la aplicación y un servidor en la nube para los procesos de demostración. Demostrando esto la posibilidad de integrar procesos de análisis de señales, inteligencia artificial y sistemas de procesamiento web en una única solución.

Teniendo en cuenta los elementos que se mencionaron en este apartado, en el siguiente punto se indica la metodología de desarrollo llevada a cabo en el proyecto.

El proyecto se desarrolló utilizando el método de cascada, en el que se llevan a cabo las actividades de manera secuencial, iniciando con una etapa de investigación del estado del arte que permitió establecer el conjunto de herramientas y algoritmos específicos a utilizar. Luego se continuó con la etapa de diseño de los módulos de caracterización, clasificación y visualización y posteriormente pasar a la etapa de implementación y validación de funcionalidad. Por último, se realizó la validación de la solución mediante dos conjuntos de datos de prueba, uno a partir de la base de datos MIT-BIH y otro a partir de datos anonimizados de pacientes entregados por el médico especialista que apoyó el desarrollo del proyecto.

La etapa de investigación consistió en búsquedas de bibliografía especializada a nivel de artículos en los que se aplican técnicas de inteligencia artificial para el análisis de señales de pruebas diagnósticas. Además, se incluyó en esta etapa el análisis de la base de datos de arritmias MIT-BIH, la cual fue seleccionada para llevar a cabo los procesos de entrenamiento y validación de la solución.

La base de datos de arritmias MIT-BIH es un conjunto de más de 4000 registros Holter a largo plazo obtenidos por el Laboratorio de Arritmia del Hospital Beth Israel. El 60% de los registros se provinieron de pacientes hospitalizados. Cada registro de Holter tiene alrededor de 30 minutos de duración. La base de datos cuenta con dos grupos de registros el primero de 23 registros y el segundo con 25 registros. El primero de los grupos sirve como muestra representativa de la variedad

Los sujetos objeto de muestra fueron 25 hombres de 32 a 99 años y 22 mujeres de 23 a 89 años [25].

En la etapa de diseño se definió la forma de articular las diferentes técnicas y herramientas seleccionadas para la generación de la solución. Para la caracterización de las señales se utilizó la transformada wavelet con las funciones Sym y Daubechies para la identificación de señales ECG, con base en las cuales es posible obtener los vectores de características de cada señal. Se incluyó además en el diseño una fase de filtrado que permita adecuar la señal para el posterior proceso de clasificación, el mecanismo de filtrado se basó en los filtros Chebyshev y Notch.

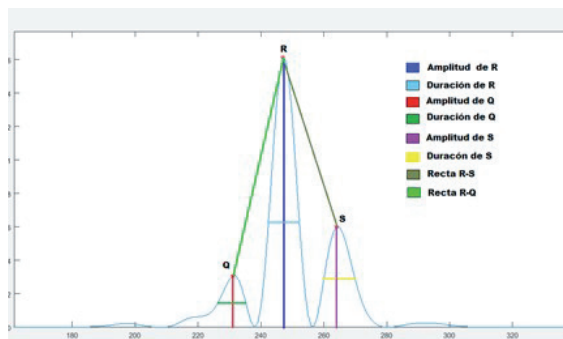
Seguidamente, para la fase de clasificación se estableció aplicar el algoritmo de aprendizaje supervisado SVM que es usado de manera regular para resolver problemas de clasificación y regresión logística [26]. La visualización de resultados se definió a través de una aplicación web a nivel de prototipo que además serviría de integradora de los diferentes módulos.

Posteriormente, se realizó la implementación de cada uno de los módulos de acuerdo a las definiciones del diseño, realizando pruebas de concepto a cada uno de los componentes, para proceder a la integración de los mismos en un solo sistema mediante el prototipo web.

Una vez verificada la funcionalidad del sistema desarrollado, se procedió a realizar la validación del mismo con datos de prueba a partir de los de la base de datos MIT-BIH y con los datos etiquetados.

el proceso de caracterización de las señales se utilizó la transformada wavelet con las funciones m y Daubechies para la identificación de señales del ECG, con base en las cuales se obtuvieron vectores de características de cada señal como se observa en la figura 1.

Figura 1.
Caracterización del Complejo QRS.



Después de esto se pasó a la fase de filtrado de la señal mediante la discriminación de esta con relación a su contenido espectral permitiendo su adecuación para el proceso de clasificación, el mecanismo desarrollado se basó en los filtros Chebyshev y Notch, En la figura 2 se muestra un esquema del proceso.

y en la figura 3 un ejemplo de imagen.

Figura 2.

Filtrado de la señal

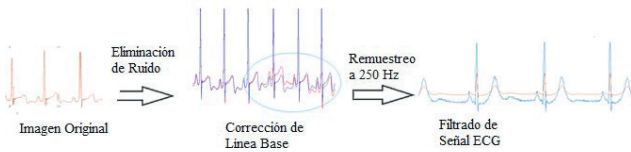
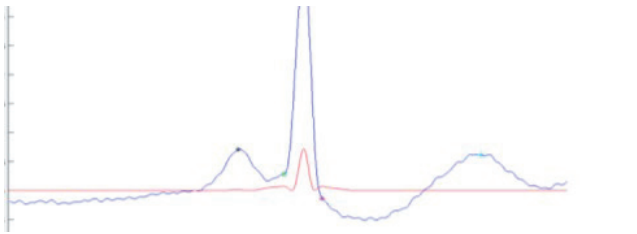


Figura 3.

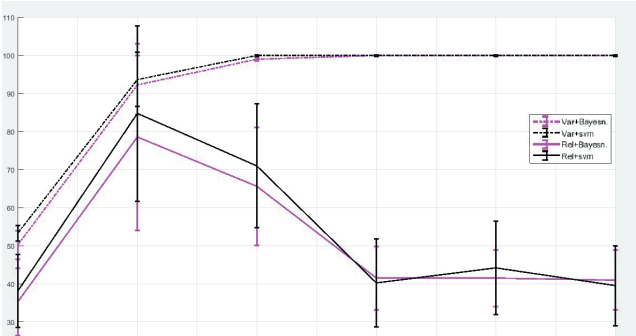
Detección del complejo QRS, pico P y T desde TW y filtro adaptativo gaussiano



Una vez la señal es pre-procesada y caracterizada, se procedió a aplicar el algoritmo de aprendizaje supervisado Máquina de Soporte Vectorial (SVM) donde, los vectores usados por el algoritmo SVM, permitieron ajustar los límites de decisión y así, reducir la dimensionalidad del conjunto de datos que está compuesto de muchas variables correlacionadas entre sí, coincidiendo con lo afirmado en [5]. Adicionalmente, se utilizó la técnica PCA para la extracción de características más relevantes y reducción de dimensionalidad sin pérdida de información fundamental. En la figura 4, se muestra la varianza según los clasificadores y la relevancia de las características según PCA, que permite observar que el proceso no se sesga a ninguna clase.

Figura 4.

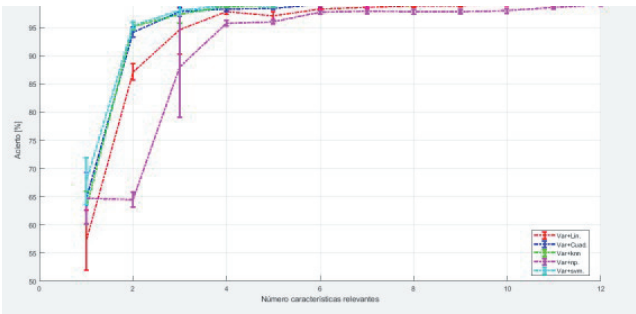
Varianza según los clasificadores y la relevancia de las características según PCA



El proceso de clasificación mediante SVM construye un hiperplano para discriminar entre diferentes tipos de clases, al que se le aplicó un kernel gaussiano lineal cuadrático para excluir cualquier punto de datos mal clasificado en el margen de las clases. El resultado se puede observar en la figura 5 que se muestra a continuación.

Figura 5.

Clasificación SVM – Kernel Gaussiano.



nismo, un prototipo web desarrollado mediante el framework Ruby on Rails con base en un modelo vista controlador MVC. Este prototipo cuenta con un módulo de usuarios que gestiona desde la autenticación hasta el almacenamiento de datos de los diferentes actores del sistema (pacientes y doctores). Posee además un módulo de gestión que permite la gestión de los pacientes que permite crear, actualizar, eliminar o visualizar información básica de los usuarios. También permite la gestión de electrocardiogramas ECG, donde el profesional puede consultar la totalidad de la señal o permitiendo explorar zonas específicas de la misma. En un panel de hallazgos se define donde aparece la arritmia encontrada por la SVM de forma que el profesional en el área de la salud obtiene un prediagnóstico de la enfermedad.

Los resultados obtenidos por medio de la aplicación con el sistema integrado para el procesamiento de la clasificación de las señales bloqueo de rama derecha (RBBB), bloqueo de rama izquierda (LBBB) y latido NORMAL del ECG corresponden a los presentados en la Fig. 5. Adicionalmente, en la tabla 1 se muestran los resultados de los diferentes clasificadores para la identificación de señales normales, LBBB y RBBB.

Tabla 1.
Resultados de clasificadores para las señales del corazón.

	Ritmo sinusal normal	LBBB	RBBB
cuadrático	0.933	0.943	0.963

Con base en los resultados, se valida la hipótesis planteada, siendo posible la caracterización de señales electrocardiográficas para identificación de arritmias cardíacas, a partir de una muestra aleatoria de la región, permitiendo obtener niveles de precisión en el diagnóstico de acuerdo con resultados que se encuentran en el estado del arte.

Conclusiones

Mediante el presente proyecto se pudo validar la posibilidad de implementar un sistema que integre procesos relacionados con el tratamiento de las señales ECG, mediante los cuales se realizaron extracción de características, filtrado, clasificación y corrección de clasificación por medio de la aplicación de la transformada Wavelet, filtros Chebyshev y Notch, análisis de componentes principales PCA y kernel gaussiano en conjunto con máquinas de soporte vectorial SVM.

Se logró el desarrollo de un sistema de diagnóstico automático capaz de apoyar la detección de algunas enfermedades del corazón, mediante la caracterización y clasificación de señales por medio de herramientas matemáticas como la transformada Wavelet y del algoritmo de clasificación basado en máquinas de soporte vectorial SVM.

Entregar un prediagnóstico de las arritmias otorga a los profesionales un insumo para tomar decisiones con respecto a electrocardiogramas largos, que pueden ser difíciles de leer y por tanto pueden producir ocasionalmente diagnósticos errados por una mala lectura. El prediagnóstico ayuda al profesional a identificar dónde se encuentran puntos críticos de los ECG y poder analizar en detalle la señal ECG para corroborar el resultado. A lo largo de este trabajo se demostró que la efectividad del sistema depende del buen proceso de entrenamiento mediante la extracción

de características dotadas de criterio médico quien basado en su experticia etiqueta los diferentes tipos de arritmias presentes en las señales ECG utilizadas como conjunto de entrenamiento.

Fue posible demostrar que la integración de varias ramas del conocimiento permite generar soluciones a problemáticas sociales que afectan a población en condición de vulnerabilidad, en este caso por su ubicación geográfica alejada de los grandes centros urbanos que cuentan con servicios de atención en salud de mayor nivel.

El grupo de investigación logró mediante este proyecto consolidar un área de investigación conjunta que integra las tecnologías de la información y las comunicaciones con el sector salud.

Reconocimientos

El presente trabajo fue desarrollado gracias al apoyo obtenido mediante la convocatoria de proyectos de innovación de la vicerrectoría de investigación, innovación y extensión de la Universidad Tecnológica de Pereira con código de proyecto “6-1810”, además del apoyo de Ja Gustavo Martínez Aroca médico especialista en cardiología.

Bibliografía

- [1]Özal Yıldırım, Paweł Pławiak, Ru-San Tan, U. Rajendra Acharya, “Arrhythmia detection using deep convolutional neural network with long duration ECG signals”Computers in Biology and Medicine Volume 102, 1 November 2018, Pages 411-420, Elsevier.
- [2]Equipo Técnico ministerio de salud y protección social, “Aspectos relacionados con la frecuencia de uso de los servicios de salud, mortalidad y discapacidad en Colombia”. Ministerio nacional de salud, 2010.
- [3] B.-U. Köhler, C. Hennig, R. Orglmeister, “The principles of software QRS detection”, IEE Eng. Med. Biol. Mag. 21 (January– February (1)) (2002)42–57
- [4] Christine M. Albert, M.D. and William G. Stevenson, M.D. “The Future of Arrhythmias and Electrophysiology”. American Heart Association/ahajournals.org (2016).

Ibrahim Ibrahim Abou Ghaleb and Mohamed Ismail Owis. "Automatic Arrhythmia Detection Using Support Vector Machine Based on Discrete Wavelet Transform", American Scientific Publishers, Vol. 6, 1-6 (2016).

Jutiérrez-Gnecchi Jose Antonio, Rodrigo Morfin-Magana, Daniel Lorias-Espinoza b, Adriana del Carmen Tellez-Anguiano, Enrique Reyes-Archundia, Arturo Méndez-Patiño and Rodrigo Castañeda-Miranda. "DSP-based arrhythmia classification using wavelet transform and probabilistic neural network", ELSEVIER: Biomedical Signal Processing and Control. Volume 32, February 2017, Pages 44-56

M.E. Herbert, S.R. Votey, M.T. Morgan, P. Cameron, L. Dziukas. "Failure to agree on the electrocardiographic diagnosis of ventricular tachycardia". Annals of Internal Medicine. DOI: 10.1016/s0196-0644(96)70293-7

ATLAS DE ANATOMIA ORDENADA Adermicina.com.ar [en línea]. [consulta: 21/11/2017]
disponible en: <http://ar.geocities.com/argenvista/corazon2.bmp>

J. D. Clifford, F. Azuaje, and P. E. McSharry, Advanced Methods and Tools for ECG Data Analysis. Artech House, Inc., 2006.

J. D. Clifford, F. Azuaje, and P. E. McSharry, Advanced Methods and Tools for ECG Data Analysis. Artech House, Inc., 2006.

J. Sotos, "Aplicación de redes neuronales artificiales en el procesado versátil de señales electrocardiográficas," 2012.

Grupo de Señales e imágenes médicas Kiron [en línea]. [consulta: 20/11/2017] Disponible en: <http://bioinstrumentacion.cia.edu.co/WebEstudiantes/2005II/marcapasos/imagenes/imag.jpg>

MATIZ, Hernando. , GUTIÉRREZ, Oscar. y TORRES, Adriana. Electrocardiografía Básica, volumen I. Universidad del Bosque, primera edición, 1999.

R. Oter Rodríguez, J. de Juan Montiel, T. Roldán Pascual, A. Bardají Ruiz, and E. Molinero de Miguel, "Guías de práctica clínica de la Sociedad Española de Cardiología en marcapasos," Rev. Esp. Cardiol., vol. 53, no. 7, pp. 947–966, 2000.

MEDLIBRES Online Medical Library [en línea]. [consulta: 25/11/2017] Disponible en: <http://medlibres.com/entry/premature-ventricular-contractions>.

- 16] A. Grossmann & J. Morlet. Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape, Soc. Int. Am. Math. (SIAM), J. Math. Analysis., 15, 723-736. (1984).
- 17] Ruch David K. and Patrick J. Van Fleet, "Wavelet Theory An Elementary Approach with Applications", Wiley, 2009.
- 18] Van Valkenburg, M. (1982). Analog Filter Design. New York: CBS College Publishing.
- 19] William, A., & Taylors, F. (1988). Electronic Filter Design Handbook. New York: McGraw Hill.
- 20] O. Chapelle, B. Scholkopf, and A. Zien, "Semi-supervised learning (chapelle, o. et al., eds.2006)[book reviews]," IEEE Trans. Neural Networks, vol. 20, no. 3, p. 542, 2009.
- 21] M. Celebi and K. Aydin, "Unsupervised Learning Algorithms," Springer, 2016.
- 22] Bielza C., G. Li, and P. Larranaga. Multi-dimensional classification with bayesian ~ network International Journal of Approximate Reasoning, 2011.
- 23] R. Saini, N. Bindal, and P. Bansal, "Classification of heart diseases from ECG signals using wavelet transform and kNN classifier," in Computing, Communication & Automation (ICCCA), 2015 International Conference on, IEEE, 2015, pp. 1208– 1215.
- 24] Yu-Jin Lin, Chen-Wei Chuang, Chun-Yueh Y, Sheng-Hsin Huang, Ju-Yi Chen and Shuenn Yuh Lee, "An AIoT Wearable ECG Patch with Decision Tree for Arrhythmia Analysis" 2019 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)
- 25] Database: <https://physionet.org/physiobank/database/html/mitdbdir/intro.htm> - visitado en mayo de 2019.
- 26] Vapnik, V.N. (2000). The Nature of Statistical Learning Theory. 2nd edn, Springer. pp 150 . L. Doobet. Stochastic Processes. Wiley, New York, 1953
- 27] Bayes de Luna Antonio, Elosura Roberto, "Muerte Súbita" Revista Española de Cardiología /ol 65. Núm 11. noviembre 2012.
- 28] Ministerio de Salud y Protección Social. Instituto Nacional de Salud. Observatorio Nacional de Salud. Segundo informe ons observatorio nacional de salud: mortalidad 1998-2011 y situación de salud en los municipios de frontera terrestre en Colombia. Carlos Andrés Castañeda Orjuela, director ONS. Bogotá: INS, 2013. 237p
- 29] SURAWICZ Rorvs et al AHA/ACCF/HRS recommendations for the standardization and electrocardiogram: part III: intraventricular conduction disturbances a scientific statement from the American Heart Association Electrocardiography and Arrhythmias Committee, Council on Clinical Cardiology; the American College of Cardiology Foundation; and the Heart Rhythm

American College of Cardiology, 2009, vol. 53, no 11, p. 976-981.

HANNUN, Awni Y., et al. Cardiologist-level arrhythmia detection and classification in ambulatory electrocardiograms using a deep neural network. *Nature medicine*, 2019, vol. 25, no 1, p. 65.

Hoekema, R., Uijen, G.J., and Van Oosterom, A. (2001). Geometrical aspects of the interindividual variability of multilead ECG recordings. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 48, 551–559.

Ashley EA, Niebauer J. *Cardiology Explained*. Chapter 8. Arrhythmia. London: Remedica; 2004.

4

**CAPÍTULO
CUATRO**

Landfill biogas models

Ángel Andrade, Álvaro Restrepo
Universidad Tecnológica de Pereira
aaandrade@utp.edu.co, arestrep@utp.edu.co

Resumen

La población mundial está en constante crecimiento y para sobrevivir como especie se necesitan recursos y energía. A medida que se acelera el crecimiento poblacional, se acelera también el consumo de recursos y materias primas, lo cual contribuye con una mayor producción de residuos sólidos. La producción de residuos ocasiona problemas al planeta en diversas áreas, principalmente aquellos asociados con la disposición final. Entre los problemas asociados a las malas prácticas relacionadas con la disposición final de los residuos se destacan: el impacto ambiental causado por la emisión de Gases de Efecto Invernadero - GEI, la filtración de lixiviados a las aguas subterráneas, los vectores endémicos, las plagas, la generación de malos olores, los problemas sociales relacionados con actividades de recolección y reciclado en rellenos sanitarios no controlados, entre otros. Debido a ello, la temática asociada con la gestión y manejo de residuos sólidos es altamente interdisciplinaria. Abarca campos del conocimiento tales como la administración de políticas públicas, ambiental, social, antropológica, económica y en el área de ingenierías, entre otras. En este documento, se presentan los modelos teóricos para simular la generación de biogás en rellenos sanitarios, las variables asociadas al fenómeno de generación de biogás, la evaluación de diferentes modelos y la valorización energética mediante aplicaciones de motogeneradores. En general, existen dos métodos para estimar la cantidad de biogás generado en rellenos. El primero de ellos es mediante el uso de modelos teóricos que representan matemáticamente los fenómenos químicos, físicos o biológicos que se llevan a cabo en la degradación del material orgánico para generar biogás. El segundo de ellos es mediante la medición directa en rellenos que dispongan de una

chías, o para el aprovechamiento energético mediante aplicaciones en motogeneradores, lucción de frío o calor, cogeneración, entre otras.

abras claves: biogás, relleno sanitario, aprovechamiento de energía.

tract

world population is constantly growing and resources and energy are needed to survive as a ies. As population growth accelerates, consumption of resources and raw materials also llerates, which contributes to greater production of solid waste. Waste production causes lems for the planet in various areas, mainly those associated with final disposal. Among the lems associated with bad practices related to the final disposal of waste, the following stand the environmental impact caused by the emission of greenhouse gases-GHG and climate ige, the leachate leaking into groundwater, endemic vectors, pests, the generation of bad odors, al problems related to collection and recycling activities in uncontrolled sanitary landfills, ng others. Due to this, the subject associated with solid waste management and handling is id and interdisciplinary. It covers fields of knowledge such as the administration of public, ronmental, social, anthropological, economic policies and in the area of engineering, among rs. In this document, the theoretical models are presented to simulate the generation of biogas ndfills, the variables associated with the phenomenon of biogas generation, the evaluation of rent models and the energy recovery by means of motor-generator applications. In general, e are two methods to estimate the amount of biogas generated in landfills. The first of these is ough the use of theoretical models that mathematically represent the chemical, physical or ogical phenomena that take place in the degradation of organic material to generate biogas. The nd of them is through direct measurement in landfills that have a biogas collection network, r to be directly emitted into the atmosphere, for burning in torches, or for energy use through ications in motor-generators, production of cold or heat, cogeneration, among others.

words: landfill, biogas, waste to energy.

roducción

.os modelos teóricos para la estimación de la generación de biogás en rellenos sanitarios son ccionados a partir de la precisión de los resultados comparado con mediciones en sitio



previamente realizadas; la disponibilidad de datos y variables asociadas al proceso. Existen modelos teóricos de primer y segundo orden. En la práctica los modelos de generación de primer orden son los más utilizados. La estimación de las emisiones de biogás de los rellenos sanitarios resulta compleja, debido a que se trata de múltiples fuentes con una alta variabilidad espacial y temporal. Las principales variables asociadas a todos los modelos son la composición de los Residuos Sólidos Urbanos- RSU y el nivel de lluvia en la región. La capacidad máxima de emisión de metano se alcanza cuando el relleno sanitario aún no ha sido clausurado, esto se debe a que la degradación de la materia orgánica (residuos de degradación rápida) ocurre en su mayoría en los primeros años. [1-2]

Después de clausurado el relleno sanitario continua con las emisiones de biogás, ya que residuos como el papel y el cartón son de degradación lenta y algunos pueden tardar en degradarse hasta 30 años, esto si las condiciones pluviales en el relleno son bajas y la región sea predominantemente seca. Algunos de los modelos de estimación de la generación de biogás en rellenos sanitarios, se presentan en la tabla 1.[3-4]

Tabla 1.

<i>Climate Chang</i>	(×	×	—			
<hr/>							
<hr/>							
<i>Modelos de generación de biogás en rellenos sanitarios.</i>							
Es un modelo que utiliza dos enfoques basados en el método de Montecarlo y aproximaciones							
GasSim							
estadísticas.							
<hr/>							
<hr/>							
<hr/>							
W S							
$M^{MNO PQR}(MCF)(F)$							
Modelo Colombiano de biogás $Q_{x9Y} = I I 2kL_L Z10[(e$							
PUS TUL,S							

jetivos

arrollar una metodología para el aprovechamiento energético de los RSU considerando la
oración energética del biogás captado del relleno sanitario.

- Caracterizar la composición elemental de los residuos sólidos de una ciudad, mediante la aplicación de la metodología propuesta.
- Implementar el uso de varios modelos teóricos para la estimación del biogás generado en un relleno sanitario.
- Evaluar la coherencia en los resultados según los valores reportados en la literatura.
- Realizar recomendaciones para el uso adecuado del biogás como combustible en aplicaciones de motogeneradores.

erente teórico

El biogás es un gas combustible que se genera por la descomposición microbiológica de la
eria orgánica en un proceso natural que tiene lugar en un entorno húmedo y en ausencia de
geno. A este proceso de descomposición se le denomina digestión anaeróbica. La digestión
eróbica convierte los compuestos complejos en compuestos simples, dando como resultado fina
iberación de una mezcla de gases. De esa mezcla, el gas que representa el mayor porcentaje es
etano con una proporción entre el 50 y 60%, mientras que el porcentaje restante se atribuye en
n medida al dióxido de carbono. La composición estimada del biogás de relleno sanitario se
estra en la Tabla 2.

la 2.

posición química promedio del biogás, adaptado de [5].

Dióxido de carbono, CO ₂	%
Temperatura	40 °C

Poder calorífico	3-23,3 'm ³
------------------	---------------------------

idación de la materia orgánica, el gas me
ralmente es emitido a la atmósfera. La c

Debido al proceso de degradación de la materia orgánica, el gas metano es un producto de los rellenos sanitarios, el cual generalmente es emitido a la atmósfera. La cantidad de metano obtenida varía en función de los siguientes factores:

- La composición de los residuos;
- El tiempo de funcionamiento del relleno sanitario;
- Las condiciones ambientales.

Uno de los principales factores en consideración para la generación de biogás, es el contenido de humedad de los RSU, el cual puede estar contenido en fracciones de volumen entre el 30 y 70%. La cantidad de residuos inorgánicos no contribuyen con la generación de biogás debido a que no se degradan anaeróbicamente. En algunos rellenos sanitarios regulados se captura y utiliza el biogás, para producir calor o electricidad. Según el estado del arte, desde el año 2001 se cuenta con información estimada de mil rellenos sanitarios que capturaban biogás en todo el mundo. En los Estados Unidos se capturan aproximadamente 2,6 millones de toneladas de metano anualmente [6].

Los estudios teóricos y experimentales desarrollados en laboratorios con condiciones controladas indican que la completa biodegradación anaeróbica de los RSU genera cerca de 100 Nm^3 de metano por tonelada seca de biomasa contenida. Sin embargo, la tasa de generación de metano reportada en los reactores anaeróbicos industriales oscila entre 40 a 80 Nm^3 por tonelada de residuos orgánicos. Algunos rellenos en los Estados Unidos reportan que capturan hasta 100 Nm^3 de metano por tonelada de RSU. Estos resultados arrojan un estimado conservativo de generación de metano alrededor de 50 Nm^3 por tonelada de RSU.[5]

Se estima que la cantidad de RSU depositados en los rellenos de todo el mundo es de aproximadamente 1,5 billones de toneladas anualmente. La tasa correspondiente de generación de metano en los rellenos estimada es de 75 billones Nm^3 . Menos del 10% de este combustible

le contribuye con el calentamiento global.

Existen algunas diferencias de un país a otro en las normativas asociadas con la gestión y manejo integral de los RSU. No obstante, la tendencia mundial es disminuir la cantidad de RSU dispuesto en los rellenos sanitarios. En algunos países como Alemania, Austria, Holanda, Dinamarca, Bélgica, Japón y Suecia, predomina el reciclaje y la recuperación energética en plantas (*Waste to Energy - WtE*), antes que la disposición final en rellenos. Países como Suecia y Japón se han trazado el objetivo de eliminar los rellenos sanitarios. Mientras los rellenos proporcionan una solución simple y económica para el problema asociado a la disposición final de los residuos, éstos causan impactos ambientales incluidos la filtración de lixiviados y emisiones de GEI. Con la implementación de los sistemas de recuperación de biogás, los rellenos sanitarios generan un curso potencial de metano como gas combustible. La captura y aprovechamiento de biogás en los rellenos sanitarios y el incremento de la vegetación son prácticas tradicionalmente aplicadas en la gestión de residuos con el fin de mitigar la degradación del ambiente circundante, lo cual además proporciona un recurso de biomasa para la producción de energía. [7]

La capacidad de los motogeneradores que funcionan con combustible a partir de biogás de un relleno sanitario, van desde 0,3 a 4 MW. Actualmente la planta más grande se encuentra ubicada en el relleno sanitario Puente Hills cerca a los Ángeles California, donde el biogás es aprovechado en un generador de vapor para obtener una potencia de 50 MW. Algunos países de la Unión Europea como Suiza, Alemania, Holanda, Suecia, Austria, Dinamarca y Bélgica han reportado una disminución en la cantidad de rellenos sanitarios abiertos, cercana al 5% desde el año 2009 debido al aumento de las tasas de impuestos asociados a la práctica. Las emisiones de metano a nivel mundial asociadas al vertido de residuos han sido estimadas por la *Environmental Protection Agency - EPA* con una media de 8,7E6 t/año. Las emisiones de metano de rellenos sanitarios es una de las causas del alarmante incremento de la concentración de metano en la atmósfera, las cuales desde 1990 son de aproximadamente 1,72 ppm en volumen, ligeramente más del doble de los valores estimados en el año 1750. Según la *EPA*, estas emisiones corresponden entre un 6 y un 13% de las emisiones totales mundiales antropogénicas y no antropogénicas. El ritmo de crecimiento anual de las emisiones de gases efecto invernadero producto de los rellenos sanitarios es estimado en 0,9%. Este crecimiento es debido fundamentalmente a emisiones de origen

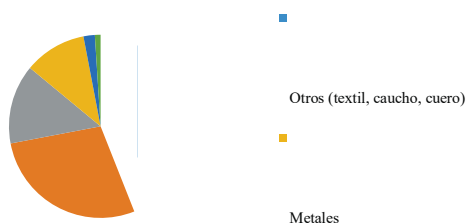
...atmósfera. [8]

Modelos de estudio

Se seleccionó como caso de estudio la ciudad Pereira- Risaralda y su relleno sanitario. Pereira es una ciudad ubicada a 1400 metros sobre el nivel del mar y una población aproximada 700000 habitantes, teniendo en cuenta su zona metropolitana. Los niveles de pluviosidad aproximadamente 2100 mm por año. La ciudad de Pereira dispone sus residuos en el relleno sanitario regional La Glorita, que cuenta con 327 hectáreas, y está localizado en el corregimiento de Combia Baja, a 14 km del casco urbano de la ciudad. En éste, un total de 17 municipios descargan sus residuos, y la ciudad aporta alrededor de 280 de las 650 t/día que se disponen en el relleno sanitario. La apertura del relleno sanitario data del año 1997 y se proyecta el año de cierre para el 2033. En promedio, los residuos que ingresan al relleno sanitario presentan una humedad de 76% asociado con la fracción orgánica. La caracterización de los RSU se presenta en la Figura 1. La densidad promedio de los RSU medidos se estableció en 335 kg/m³, y el peso específico 5341N/m³. [9]

Figura 1.

Caracterización RSU del relleno sanitario La Glorita. [10]



La caracterización de los RSU que se presenta en la Figura 1, fue utilizada como datos de entrada para los modelos seleccionados a estudiar. Se seleccionaron tres modelos. El modelo LandGE

seleccionó debido a que es el más utilizado a nivel mundial. El modelo colombiano se seleccionó debido a que está reconocido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (*United States Environmental Protection Agency – US EPA*), modificado para tener en cuenta las características climatológicas de la región de estudio. Finalmente se seleccionó el modelo GasSim debido a que es ampliamente utilizado en la comunidad europea.

Modelo LandGEM

El modelo LandGEM es utilizado para estimar la cantidad de biogás generado en los rellenos sanitarios. Este modelo se basa en una ecuación de descomposición cinética de primer orden para estimar las emisiones derivadas de la descomposición de los residuos orgánicos presentes en los RSU. El modelo LandGEM se presenta en la (Ec. 1).

$$CH_4 = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{M_i}{L_i} (1 - e^{-k(t-t_i)})$$

donde:

n : año desde el año de apertura +1 ($i=1$) hasta el año de proyección (n);

t : tiempo de incremento de cada año;

t_i : tiempo de incremento para cada año;

M_i : generación máxima de metano [$m^3/año$];

L_i : límite de generación de metano [$1/año$];

M_M : generación potencial de metano [m^3/Mg];

M_i : masa de residuos sólidos dispuestos en el año i [Mg];

t_j : periodo en que los RSU totales M_M dispuestos en el año i , con incrementos t_j .

De la tasa de RSU depositados en un relleno sanitario, las emisiones de metano pueden ser estimadas suponiendo que de L_L es $170 m^3/Mg$ y k es $0,05 [1/año]$. Estos valores son recomendados para países en vía de desarrollo en los cuales la composición de los RSU corresponde con una proporción alta de residuos orgánicos. Para rellenos sanitarios a cielo abierto, el potencial de emisión de metano puede asumirse como el 50% del valor de rellenos sanitarios controlados y cubiertos, o

el promedio equivalente a 85 m³/Mg. El índice de generación de metano k , representa la tasa biodegradación de los residuos orgánicos de primer orden en la cual el metano es generado hasta de disponer finalmente los RSU en el relleno. Este parámetro depende del contenido de humedad de la disponibilidad de nutrientes, el pH y la temperatura. El contenido de humedad es importante ya que funciona como transporte de nutrientes y bacterias. [11]

La humedad en el relleno depende de la infiltración de las lluvias, la cobertura, el tipo de impermeabilización de la base del sistema, la recirculación de lixiviados y la profundidad vertido [12]. Las tasas de degradación más rápidas (de 3 años aproximadamente) están asociadas a condiciones de alta humedad y de residuos de degradación muy rápida como los alimentos. Las tasas más lentas, están asociadas a residuos como el papel y el cartón de degradación lenta, con un periodo de degradación cercano a 35 años. [13]

El parámetro L_0 , llamado potencial de generación de metano estima la cantidad de metano potencialmente producida por un kilogramo de RSU cuando son degradados, por lo cual depende de la caracterización físico-química de los RSU en porcentaje en pesos y masas. Este parámetro se presenta en la (Ec. 2). [14]

$$L_0 = (MCF) \cdot (DOC) \cdot (DOCF) \quad \text{---} \quad (\text{Ec. 2})$$

donde:

MCF : factor de corrección para el metano;

DOC fracción de carbono orgánico degradable;

$DOCF$: fracción de carbono orgánico degradable asimilado;

F : fracción de metano en el biogás;

Sh

---: constante estequiométrica.

Si

El factor de corrección para el metano MCF es un ajuste para estimar la generación de biogás que el modelo toma en cuenta ya que depende del grado de degradación anaeróbica de los RSU. Este valor depende de la profundidad y el tipo de relleno sanitario (controlado, no controlado)

abierto, etc) y las prácticas de gestión y manejo asociadas. La Tabla 3 expone los valores os del parámetro *MCF*.

a 3.

res estimados del parámetro *MCF*. Adaptado de [14].

Controlado	;	1,0
Condición desconocida	†	0,8

os valores estimados del factor de carbono orgánico degradable *DOC* depende de la posición de los RSU, por lo cual varía de acuerdo a cada relleno sanitario y cada país. Este metro se estima según la Ec.3 [14-15].

$$DOC = 0,40(A) + 0,17(B) + 0,15(C) + 0,30(D) \qquad (Ec. 3)$$

le:

- orcentaje de los residuos que corresponde al papel, cartón y los textiles;
- orcentaje de los residuos que corresponde a los desechos de jardín y de los parques u otros
- chos orgánicos putrescibles (excluidos los alimentos);
- orcentaje de los residuos que corresponde a los restos
- alimentos; *D*: porcentaje de los residuos que
- sponde a madera.

arámetro fracción de carbono orgánico degradable asimilado *DOC₉*, se calcula mediante la ción (Ec. 4).

$$DOC_9 = 0,014T + 0,28 \qquad (Ec. 4)$$

le:

T : temperatura. [°C].

La Ec. 4 está basada en el modelo teórico que varía sólo con la temperatura en la zona anaeróbica del relleno sanitario. El valor predeterminado utilizado por la IPCC es de 0,77. No obstante el factor puede variar desde 0,42 para 10 °C hasta 0,98 para 50 °C. De hecho, en muchos rellenos sanitarios profundos (>20 m) las temperaturas que se han registrado son mayores a 50 °C, lo que implica condiciones claramente anaeróbicas.

Modelo GasSim

Este modelo se encuentra integrado mediante un software de libre licencia en su versión beta, el cual modela el impacto ambiental provocado por los rellenos sanitarios. Tiene como objetivo ser una herramienta para estimar las emisiones anuales de biogás, diferentes especies tóxicas y sustancias generadas en un relleno sanitario. Este modelo es aceptado desde 1998 como referente por la agencia de medio ambiente británica para la evaluación de emisiones en rellenos sanitarios; el uso de otros modelos debe ser justificado, mientras que los resultados obtenidos por GasSim son aceptados directamente. El modelo entrega un reporte de 45 especies diferentes las cuales están listadas en un reporte de 25, 50 y 75 percentiles. Los resultados del 50 percentil pueden ser utilizados para analizar las emisiones en escenarios no controlados. El modelo se divide en tres módulos. El primer módulo define el tipo de residuos a analizar y el segundo se refiere a las emisiones generadas por el relleno sanitario. El biogás generado se calcula mediante el análisis del tipo de residuos depositados y su caracterización elemental. [16]

El modelo GasSim estima la generación del biogás y otras especies, a partir de la composición de los RSU y el tiempo de llenado de la celda en uso del relleno sanitario. También estima modelos de dispersión, el impacto en los alrededores cuando se implementan medidas de gestión como antorchas y motores de combustión interna. La representación de la incertidumbre (estadísticamente) es determinada mediante el método de Montecarlo.

Modelo colombiano de biogás

El Modelo está basado en una ecuación de degradación de primer orden. Este modelo requiere que el usuario suministre datos relacionados con el relleno sanitario tales como: el año de apertura, el año de clausura, índices de disposición anual, ubicación del sitio y contestar algunas preguntas.

rentes a las condiciones físicas pasadas y presentes del sitio. El modelo provee automáticamente valores para cada uno de los 33 departamentos en Colombia. Los parámetros utilizados por el modelo fueron desarrollados usando datos específicos de clima, caracterización de residuos y prácticas de disposición de residuos de Colombia y estima el efecto de estas condiciones en las tasas y índices de generación de biogás. El Modelo colombiano se presenta en la Ec. 5. Fue desarrollado con el objetivo de proveer proyecciones de generación y recuperación de biogás: servidores aplicadas al caso colombiano; el mismo se basa en el modelo mexicano de biogás: versión 2.0, y el modelo de residuos 2006 del IPCC.

10

PUS
TUL,S

de:

Q_V : flujo de biogás máximo esperado [$m^3/año$];
 incremento en tiempo de 1 año;
 año del cálculo- año inicial de disposición de residuos;
 incremento de tiempo en 0,1 años;
 índice de generación de metano [$l/año$];
 generación potencial de metano [m^3/Mg];
 masa de residuos dispuestos en el año i [Mg];
 edad de la sección j de la masa de residuos M_i dispuesta en el año i ;
 F : factor de corrección de
 tano; F : factor de ajuste por
 endios.

Resultados modelo LandGEM

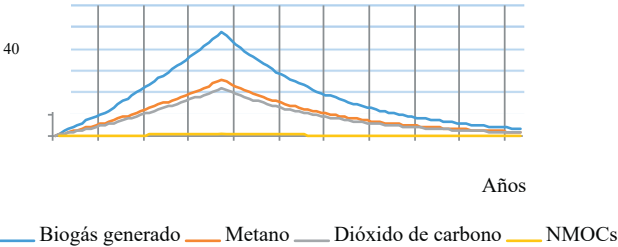
Las condiciones que se utilizaron para realizar la simulación de generación de biogás del relleno sanitario La Glorita, se presentan en la Tabla 4. Las condiciones iniciales fueron determinadas:

Tabla 4.
Condiciones iniciales para la estimación del biogás mediante el modelo LandGEM.

Nombre del relleno sanitari	La Glorita
Capacidad del relleno proyectada	10736 [Mg]
Concentración de componentes volátiles orgánicos no metanos	600 [ppmv] como hexanos
Contenido de metano estim	54%

Los resultados de la simulación del modelo LandGEM se presentan en la Figura 2.

Figura 2.
Resultados del modelo LandGEM.



Según los resultados presentados en la Figura 2, la curva de generación crece hasta obtene valor máximo de biogás de 47,78E6 m³/año proyectado para el año 2034, un año después del tier proyectado para la clausura del relleno sanitario. Así mismo, la cantidad máxima de met obtenida es de 25,8E6 m³/año y el dióxido de carbono generado es 22E6 m³/año. Como se

rva en la curva de generación, la fracción correspondiente a los compuestos orgánicos no
nos (*Non methane organic compounds* – NMOCs) es baja.

a partir de los resultados se concluye que la generación de metano empieza a disminuir
ledor del tiempo proyectado para el cierre del relleno sanitario, no obstante, la emisión de gases
oyecta hasta casi el año 2100 ya que los elementos como el papel y el cartón son de degradación
i. La generación de lixiviados y el modelado no se tuvo en cuenta en esta simulación debido a
scases en la información recopilada y las dificultades de las mediciones in situ. Así mismo, el
meno de migración de biogás por los costados no se tuvo en cuenta.

ltados modelo GasSim

imulación de generación de biogás del relleno La Glorita según el modelo GasSim se realizó
ndo en cuenta las condiciones iniciales presentadas en la Tabla 5.

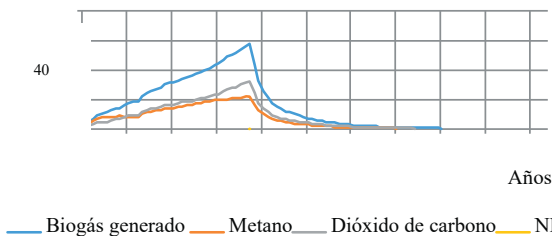
la 5.
diciones iniciales para la estimación del biogás mediante el modelo GasSim.

iodo de simulación	ños (hasta el 2100)
tenido de metano estimado	
o de aislamiento de la celda con ierra	la de 1m de espesor y recubrimiento plástico de n.
ntidad de RSU depositados	ftware se modificó para tener en cuenta las ciones del caso de estudio.

resultados de la simulación del modelo GasSim se resumen en la Figura 3.

Figura 3.

Resultados del modelo GasSim.



Según los resultados presentados en la Figura 3, la curva de generación de biogás crece alcanzar un valor máximo estimado en 57,7E6 m³/año proyectado para el año 2034, ur después de la clausura del relleno sanitario. La cantidad máxima de metano obtenida es de m³/año y el dióxido de carbono generado es en 32,1E6 m³/año. Como se observa en la cur generación, la fracción correspondiente a los NMOCs es baja, siendo los resultados coheren ser comparados con los obtenidos mediante el modelo LandGEM. Los parámetros relacionado la generación de lixiviados, las migraciones laterales de biogás y el aprovechamiento energético antorchas o motores de combustión interna, no se tuvieron en cuenta en este análisis a pesar d el software permite modelar estas condiciones. Esto debido a la poca disponibilidad de información relacionada con el relleno sanitario.

Resultados modelo colombiano

La simulación se realizó con los parámetros iniciales que se presentan en la Tabla 6. Los resultados gráficos de la simulación del modelo colombiano se presentan en la Figura 4.

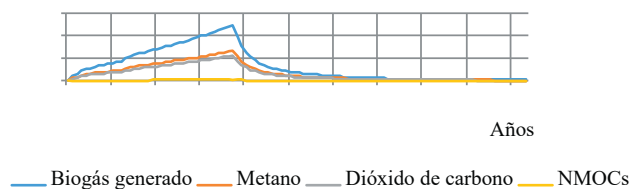
Tabla 6.
Condiciones iniciales para la estimación del biogás mediante el modelo colombiano.

ión	2- Andina
posición anual del año más reciente	292000 [Mg]
Series de estudio	Biogás, metano, dióxido de carbono y NMOCs

Figura 4.

ra 4.

ltados del modelo colombiano.



egún los resultados presentados en la Figura 4, la curva de generación crece hasta obtener un máximo de biogás generado de 49,19E6 m³/año para el año 2034, un año posterior al e del relleno sanitario. Así mismo, la cantidad máxima de metano estimada para este año es de 22,1E6 m³/año y el dióxido de carbono generado es 22,1E6 m³/año. Como se observa en la curva de generación, la fracción correspondiente a los NMOCs es baja. Estos resultados son muy cercanos obtenidos con el modelo GasSim.

aciones del biogás

partir de la cantidad estimada de biogás generado en el relleno La Glorita, se procede a ar el poder calorífico del combustible para posteriormente ser utilizado en aplicaciones de

mediante la diferencia de entalpías ΔH_f de los reactivos $h_{f,r}$ y los productos de la combustión $h_{f,p}$, tal como se presenta en la (Ec.6), siendo n_r y n_p , las fracciones molares de los reactivos y productos de la combustión.

$$\Delta H_f = h_{f,p} - h_{f,r} = PCI = \sum_{TUS} n_r \cdot h_{f,r} - \sum_{TUS} n_p \cdot h_{f,p} \quad (Ec.6)$$

Para realizar la simulación de combustión, se utilizó el software Gaseq el cual es de carácter gratuito. Las condiciones de la simulación se presentan en la Tabla 7

Tabla 7.

Condiciones iniciales para la simulación de combustión en el software Gaseq.

Temperatura de entrada de los reactivos	98 [K]
Presión del reactor	[atm]

Tabla 8.

Reactivos y productos generados en la reacción de combustión del biogás del relleno sanitario Glorita.

Reactivos [moles]	Productos [moles]
CO = $3,4 \cdot 10^{N\#}$	0,0060
-	0,0169

Reemplazando los valores obtenidos de la simulación de combustión que se presenta en la Tabla 8 se obtiene la (Ec. 7)

$$PCI = 0,53768 \{h\}_{F\#} + 0,41791 \{h\}_{Fi} + 0,000342 \{h\}_{F} - 0,94984 \{h\}_{Fi} + 1,06896 \{h\}_{Gi} + 0,00601 \{h\}_{F} \quad (Ec. 7)$$

De los valores de las tablas termodinámicas, las entalpías de formación de las especies consideradas en la simulación a T=298K son:

$$\{h\}_{F} = -110,54 [\text{MJ/kmol}] \quad \{h\}_{Gi} = 0 [\text{MJ/kmol}]$$

$$\{h\}_{i} = 0 [\text{MJ/kmol}]$$

$$\{h\}_{ei} = 0 [\text{MJ/kmol}] \quad \{h\}_{F} = -393,52 [\text{MJ/kmol}] \quad \{h\}_{Gi} = -241,83 [\text{MJ/kmol}]$$

Finalmente reemplazando los valores de las entalpías de formación, se obtiene el

$$\text{valor del poder calorífico. } PCI = 428,2015$$

[MJ/kmol]

Lo que es igual a:

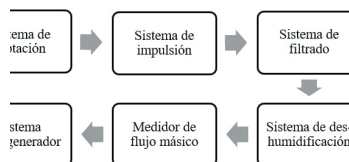
$$PCI = 15,86[\text{MJ/kg}] = 20,22 [\text{MJ/m}^3]$$

El poder calorífico estimado es coherente con los resultados presentados en [15] los cuales reportan un PCI del biogás captado de un relleno sanitario en España equivalente a 16 MJ/m³ siendo un poco menor ya que el contenido de metano estimado en el artículo fue determinado en 46% a diferencia del contenido de metano estimado en este proyecto equivalente a 54%. Valores equivalentes a los registrados en la literatura en donde se reporta que el PCI del biogás de relleno oscila entre 13 y 23 MJ/m³ con un contenido de metano del 50% aproximadamente [11]. La cantidad estimada de biogás captado del relleno La Glorita fue presentada y el cálculo de su poder calorífico muestra que se puede aprovechar en aplicaciones de motogeneradores con el fin de

os resultados que se presentan a continuación corresponden a una adaptación del proyecto de investigación con desarrollado en Brasil titulado: “*Desenvolvimento de soluções tecnológicas a partir do biogás produzido em sistemas de tratamento de esgotos e aterros sanitários para a geração de energia elétrica. Rede Biogás (Edital FINEL 06/2010- Saneamento Ambiental e itação). Convênio FINEP: 23076.032233/2011-54*”. Este proyecto consistió en diseñar un sistema de purificación y filtración de biogás captado del relleno sanitario de la ciudad de Brusque, un motor de ciclo Otto en V8 de 5,7 litros marca General Motors de 116 kW a 3000 rpm, el es acoplado a un generador eléctrico marca WEG modelo 200SI17 de 59 kW a 1800 rpm. Se diseñó un panel de control para realizar las mediciones del sistema de generación entre 10 y 60 El diagrama de flujo del proyecto diseñado se muestra en la Figura 5.

Figura 5.

Diagrama de flujo de los diferentes sistemas para el aprovechamiento de biogás de relleno sanitario.



El sistema de purificación se diseñó con dos filtros de carbono activado y dos filtros de óxido de cobre, con el fin de limpiar las impurezas presentes en el biogás y evitar posibles daños en el sistema motogenerador.

sanitario recibe aproximadamente 800 toneladas de residuos sólidos diariamente, siendo un valor aproximado con el del relleno La Glorita. La Figura 6 muestra el panel móvil del banco de filtrado y purificación de biogás construido.



Figura 6. Banco de filtrado y purificación de biogás de relleno sanitario.

A partir de los resultados obtenidos del poder calorífico del biogás, se procede a calcular la potencia eléctrica generada por el sistema. La electricidad anual generada fue estimada mediante la (Ec. 8). [11]

$$(Ec. 8)$$

$$AE$$

donde:

AE: electricidad anual generada [kWh/año];

CLB: volumen de biogás captado del relleno sanitario [m³/año];

LHV: poder calorífico inferior del biogás captado [MJ/año];

HR: potencia utilizada por el motor de combustión interna para generar un kilovatio hora de electricidad, los rangos están entre 9,5 y 12,5 [MJ/kWh];

PL: carga parasita, y representa la cantidad de electricidad utilizada por el compresor y otros elementos utilizados en el sistema de generación, normalmente están entre 0,04 a 0,08;

AF: eficiencia del motor, normalmente se asume entre 0,92 y 0,96, de acuerdo al equipo seleccionado y al mantenimiento.

Otro modelo propuesto para estimar la potencia eléctrica generada a partir del biogás captado del relleno sanitario es presentado en [7], como se muestra en la (Ec. 9)

$$W_s = (LFG_{G\#}) \cdot 20^{100} \cdot 221 Z^{GW} Gg^h [\quad (Ec. 9)$$

donde:

W_s: potencia eléctrica generada [GWh/año]

LFG_{G#}: cantidad total de metano generado [Gg/año]

La potencia eléctrica total generada también puede ser determinada mediante el modelo colombiano el cual arroja una eficiencia en la captura estimada en 77%. Los valores del metano captado hacen referencia a un promedio de los modelos de estimación de biogás presentados. Los resultados generales de la potencia eléctrica total generada, se presentan en la Figura 7.

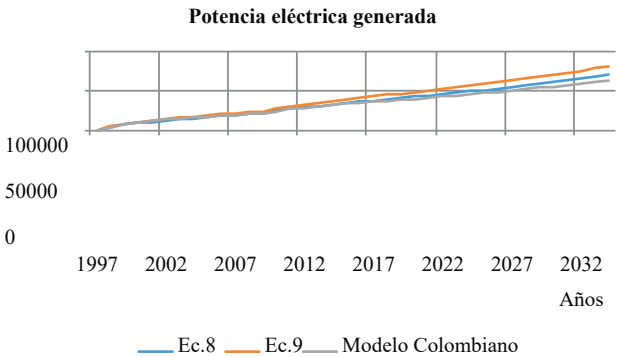


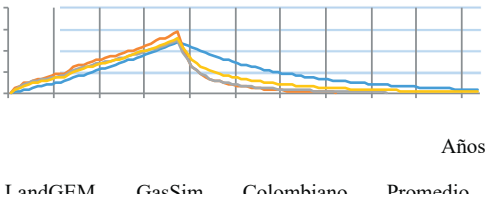
Figura 7. Potencia eléctrica generada por el biogás del relleno La Glorita.

Conclusiones

Se presentaron tres modelos de estimación de biogás a partir de la degradación de los RSU en el relleno sanitario La Glorita. Los resultados generales del biogás estimado de los modelos evaluados se presentan en la Figura 8.

Figura 8.

Modelos de generación de biogás del relleno sanitario La Glorita.



Para que un proyecto de generación de electricidad mediante motogeneradores con capacidades entre 800 kW y 3 MW sea viable, el relleno sanitario debe captar biogás con una composición de 50% de metano y con caudales entre $4,4 \sim 16,5E6 \text{ m}^3/\text{año}$. Se concluye que el relleno sanitario La Glorita tiene el potencial para generar electricidad como energía renovable del biogás captado de relleno sanitario. Esto es corroborado al analizar la Figura 8 al obtenerse capacidades coherentes. Como se observa en la Figura 8, a pesar de que la cantidad de biogás se estimó mediante tres modelos completamente diferentes, los resultados son similares y se puede concluir que convergen.

Por otro lado, al analizar las ventajas de cada modelo evaluado, se concluye que a pesar de que todos los tienden a valores similares, los modelos que representan mejor el fenómeno son el modelo colombiano y el modelo GasSim.

El modelo colombiano tiene la ventaja de que fue desarrollado teniendo en cuenta las condiciones del país y estima automáticamente los diferentes parámetros asociados como lo son el índice de generación de metano k y el factor de generación potencial de metano L_L , de acuerdo a la región de análisis del país. Así mismo permite obtener estimado de la capacidad de generación de electricidad en aplicaciones de motogeneradores según las proyecciones de captaciones simuladas. El modelo presenta la desventaja de que no permite caracterizar los RSU para cada caso específico de tal forma que el usuario los ingrese manualmente ya que el software está protegido y no permite realizar modificaciones al código. El modelo colombiano tampoco permite simular las condiciones del relleno como el nivel de compactación de residuos, el aislamiento superficial de los RSU y con los suelos, la generación de lixiviados, las migraciones laterales y otros factores asociados al fenómeno.

El software GasSim es completo y de los modelos evaluados es el que mejor resultados ofrece ya que permite analizar diversas especies generadas en el proceso de degradación anaeróbica y analizar los fenómenos de dispersión y aprovechamiento energético, sea simplemente quemando el biogás captado en antorchas o en aplicaciones de generación eléctrica como motogeneradores. Así mismo permite estimar el impacto ambiental causado por la liberación de dióxido de carbono de la planta de aprovechamiento del biogás captado. Por contras, el modelo GasSim necesita ser

entado por muchos parámetros iniciales que en la mayoría de los casos son desconocidos por operadores de los rellenos sanitarios en Colombia y demandan de investigaciones para ser minimizados. La escasa información referente al tema hace que aplicar el modelo sea complejo, aún porque se necesita tener un conocimiento avanzado para obtener resultados coherentes. El software ya que su uso no es tan intuitivo.

El modelo LandGEM a pesar de que es uno de los más aplicados, no permite caracterizar los RSUs en casos específicos y tampoco tiene en cuenta las características como el tipo de celda, nivel de compactación, generación de lixiviados, migraciones laterales, entre otros. No obstante, la ventaja del modelo LandGEM radica en que es un modelo de primer orden simple y esto lo hace fácil de implementar ya que no requiere conocer muchos parámetros para realizar la simulación y los resultados obtenidos corresponden con una buena aproximación del fenómeno real.

Se concluye que la disminución del impacto ambiental por la mitigación en la liberación de metano a la atmósfera, como se presenta en la Figura 9, es de aproximadamente 60 t. Teniendo en cuenta que el metano tiene un índice de calentamiento global 33 veces mayor que el dióxido de carbono según cifras del IPCC, esto equivale aproximadamente a 19,8E6 t. de dióxido de carbono equivalente en un horizonte de sucesos comprendido entre los años 1997 y 2100, proyectando el cierre de clausura del relleno sanitario para el año 2033.

Figura 9.

Equivalente evitado por la no liberación de metano.



Es importante resaltar que todo proyecto de aprovechamiento energético debe estar enmarcado dentro de las políticas de reducción de gases de efecto invernadero. Actualmente la mayoría de los gobiernos trabajan en políticas sociales con el fin de disminuir la cantidad de RSU depositados en los rellenos sanitarios y estimulan proyectos relacionados con el reciclaje. La dificultad de desarrollar tecnologías en el país que aprovechen energéticamente fuentes no renovables radica, entre otras cosas, en los escasos recursos que se invierten en investigación, la poca información referente al tema, la complejidad de la normativa nacional, entre otros factores.

De acuerdo con las razones expuestas, finalmente se concluye que es fundamental involucrar varios sectores como la academia y la industria privada, con el fin de realizar inversión en tecnologías alternativas y garantizar la viabilidad técnica y económica de este tipo de proyectos a mediano y largo plazo.

Agradecimiento

Los autores ofrecen un especial agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión de la Universidad Tecnológica de Pereira y al grupo de investigación en Gestión Energética – GENERGÉTICA, por el apoyo recibido para el desarrollo de este capítulo.

Bibliografía

- [1] M. Santos, A. v. Elk y C. Romanel, «A correction in the CDM methodological tool for estimating methane emissions from solid waste disposal sites,» *Journal of Environmental Management*, vol. 164, n° 0301-4797, pp. 151-160, 2015.
- [2] R. V. Karanjekar y e. al, «Estimating methane emissions from landfills based on rainfall, ambient temperature, and waste composition: The CLEEN model,» *Waste Management*, vol. 46, n° 0956-053X, pp. 389-398, 2015.
- [3] M. I. Mandujano, A. Felix y A. M. Martinez, BIOGAS, energía y fertilizantes a partir de desechos orgánicos, Cuernavaca Mexico: OLADE, serie publicaciones especiales, 1981.
- [4] M. C. C. Sarmiento, «D WASTE- Waste Management for everyone,» 24 Octubre 2012. [En línea]. Available: <http://www.d-waste.com/new-infographics/item/114-solid-waste-management-in-colombia.html>. [Último acceso: 1 marzo 2017].
- [5] N. J. Themelis y P. A. Ulloa, «Methane generation in landfills,» *Renewable Energy*, vol. 32, n° 0960-1481, p. 1243– 1257, August 2007.
- [6] S. Teixeira y e. al, «Prospective application of municipal solid wastes for energy production in Portugal,» *Energy Policy*, vol. 71, n° 0301-4215, pp. 159-168, 2014.

- N. Bolan y e. al, «Landfills as a biorefinery to produce biomass and capture biogas,» *Bioresource Technology*, vol. 135, n° 0960-8524, p. 578–587, 2013.
- G. I. d. E. s. C. C. IPCC, «Cambio climático 2014- Mitigación del cambio climático,» IPCC, Berna-Suiza, 2015.
- Secretaria de planeación municipal de Risaralda, «Plan de Desarrollo de Pereira,» Alcaldía de Pereira, 12 2008. [En línea]. Available: http://planeacion.risaralda.gov.co/Documentos/site/planeacion/documentos/plan_de_desarrollo/2008-2011. [Último acceso: 2 3 2017].
- ATESA DE OCCIDENTE S.A E.S.P, «Informe de caracterización de residuos a disponer en el relleno sanitario La Glorita de la ciudad de Pereira,» Pereira, Colombia, 2015.
- R. Broun y M. Sattler, «A comparison of greenhouse gas emissions and potential electricity recovery from conventional and bioreactor landfills,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, n° 0959-6526, pp. 2664-2673, 2016.
- J. Bogner y e. al, «Chapter 10. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the IPCC,» de Waste Management, In *Climate Change 2007: Mitigation.*, United Kingdom and New York, Cambridge University Press, 2007, pp. 587-613.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE- IPCC, «2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories,» NATIONAL GREENHOUSE GAS INVENTORIES PROGRAMME, Washington D.C., United States of America, 2006.
- A. Alexander y e. al, «Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide,» Environmental Protection Agency-EPA, Washington DC, 2006.
- M. Zamorano y e. al, «Study of the energy potential of the biogas produced by an urban waste landfill in Southern Spain,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, n° 1364-0321, p. 909–922, 2007.
- Golder Associates, «GasSim 2.5,» Golder Associates, February 2012. [En línea]. Available: <http://www.gassim.co.uk/>. [Último acceso: 7 March 2017].

5

CAPÍTULO
CINCO

Potencial productivo, energético y exergético de biomasa residual agrícola para propósitos de gasificación

Productive, energy and exergy potential of agricultural biomass residues for gasification

David A. Serrato, Álvaro Restrepo, Juan E. Tibaquirá

Universidad Tecnológica de Pereira

daserrato@utp.edu.co, arestrep@utp.edu.co, juantiba@utp.edu.co

Resumen

En este capítulo es considerada la estimación del potencial productivo, potencial energético y exergético a nivel nacional y departamental de tres residuos agrícolas de interés; hueso de palma de aceite, cascarilla de café y cascarilla de arroz, provenientes de cultivos representativos disponibles en Colombia, biomasa considerada como una fuente renovable de energía de carbono neutro, a partir de la cual pueden sintetizarse energéticos en fase gaseosa como el “syngas” mediante procesos de gasificación, los cuales tienen el potencial para reducir la dependencia de fuentes de energía de origen fósil asociadas a la alta tasa de emisiones de gases de efecto invernadero y emisiones contaminantes en el mundo. Fue propuesto un modelo matemático con el fin de estimar el potencial energético teórico de la biomasa residual, con el fin de identificar los departamentos donde podría considerarse la implementación de sistemas de generación de potencia híbridos basados en el acoplamiento de una celda de combustible de óxido sólido (SOFC) y microturbina a gas (MGT), sistemas compactos a pequeña escala que pueden ser utilizados en regiones o zonas no interconectadas a una red central de suministro de energía eléctrica, y los cuales incentivan el uso de estrategias energéticas de autoabastecimiento mediante el aprovechamiento de dicho recurso energético. Fue estimado un potencial energético y exergético considerando los departamentos identificados como aquellos cuya producción conjunta representa un 96,2 % de la generación de residuos, de ~5.585 TJ y ~7.161 TJ, respectivamente. Por otro lado, fue estimado que el sistema híbrido tiene una capacidad de generación neta de potencia de 2,831 kW por kg/h de biomasa que ingresa al gasificador, cuando es utilizado syngas obtenido a partir de la gasificación de hueso de palma de aceite, y de 2,219 kW por kg/h de biomasa y de 1,716 kW por kg/h de biomasa cuando el sistema es alimentado con syngas obtenido a partir de la gasificación

Palabras clave: biomasa, energía, exergía, gasificación.

Abstract

This chapter is considered the estimation of national and municipal productive, energy and exergy potential of three agricultural residues in Colombia; palm oil kernel, coffee husk and rice husk, mass identified as a zero carbon dioxide renewable energy source, from which it is possible to generate a secondary and more flexible energy source in gaseous phase such as the syngas by gasification processes, which own the potential to reduce the dependency from fossil energy sources linked to high rates of greenhouse and polluting gas emissions in the world. It was presented a mathematical model in order to estimate the theoretical potential of the agricultural residual mass and to identify which regions and municipalities in Colombia could be considered as suitable locations of hybrid power generation systems based on a solid oxide fuel cell (SOFC) and micro gas turbine (MGT), compact and small scale systems which could be used in regions and interconnected zones to an electrical network system, promoting the implementation of energy management strategies of self-supplying by feeding these type of systems with this kind of energy source locally available. It was estimated that the energy and exergy potential for 18 regions whose total production of agricultural residues accounts 96,2%, is ~ 5.585 TJ and ~ 7.161 TJ, respectively. By the other hand, it was estimated that the hybrid power generation system has a power generation net capacity of 2,831 kW per kg/h of biomass when the systems is fed with syngas obtained by the gasification of palm oil kernel, a power generation net capacity of 2,219 kW per kg of biomass and 1,716 kW per kg/h of biomass when the system is fed with syngas obtained by the gasification of coffee husk and rice husk, respectively. **Keywords:** biomass, energy, exergy, gasification

Introducción

El abastecimiento diversificado y sostenible de la energía dado el aumento en el consumo de recurso a nivel mundial, efecto de un crecimiento progresivo de la demanda asociada a la aplicación de las necesidades energéticas de los seres humanos y al aumento continuo de la población mundial, es uno de los desafíos críticos que enfrenta la humanidad en la actualidad, en un escenario donde el suministro de energía se garantiza principalmente mediante la utilización de recursos de origen fósil como el petróleo, el carbón y el gas natural [1].

Considerando las proyecciones futuras, de acuerdo con la IEA - *International Energy Agency* [2], se estima un aumento en la demanda de energía a nivel mundial del 1,6% en promedio a durante el 2006 y el 2030, de 472 EJ (11.730 Mtoe) a 714 EJ (17.010 Mtoe). Según la EIA – *Energy Information Administration* [3], entre las fuentes de energía disponibles a futuro, el petróleo y otros combustibles líquidos seguirán siendo las fuentes de energía de mayor uso, a pesar de entre los años 2012 y 2040 se estima una reducción del 3% de su consumo en el mercado energético global. Sin embargo, y en contraste a esta tendencia, se pronostica que el aumento en el consumo de combustibles líquidos será sólo del 1,1% en promedio anual en el sector transporte, y del 1% en promedio anual en el sector industrial; con subsecuentes reducciones en el sector residencial eléctrico donde se consideran seriamente la utilización de alternativas ligadas a fuentes de energía renovable, que de acuerdo a las proyecciones, serán las fuentes de más rápido crecimiento con tasa de expansión del 2,6% en promedio anual entre el 2012 y el 2040.

Entre las fuentes de energía renovable disponibles, la biomasa es considerada una fuente de energía neutra, siendo la única fuente de energía renovable que puede ser transformada en un producto energético en fase sólida, líquida o gaseosa mediante múltiples procesos de conversión energética [4]. De acuerdo con Long H. *et al.* [5], la producción de bioenergía basada en biomasa supone el 9-13 % del consumo total de energía a nivel mundial, lo cual supone ser una de las fuentes de energía renovable más prometedoras en el futuro; ser una fuente de energía disponible localmente [6]; y de ser una fuente con el potencial de reducir la dependencia existente de los combustibles de origen fósil, contribuyendo en consecuencia a la disminución de las tasas de emisión de gases de efecto invernadero y emisiones contaminantes [7].

Siendo una realidad mundial, en Colombia la utilización de biomasa como fuente energética no se contabiliza en la canasta energética actual o en sus proyecciones futuras a corto y mediano plazo, lo que indica que no ha sido considerada aún como una alternativa energética promissora a pesar de poseer una alta disponibilidad de recurso en toda la extensión de su territorio [8]. De acuerdo con Gonzalez-Salazar MA *et al.* [7], desafíos importantes deben ser contemplados para hacer uso de la biomasa, entre los que se encuentran, la competencia por el uso de la tierra, la deforestación, la contaminación y la reducción de las fuentes hídricas. Por consiguiente, ha sido identificado que es esencial la formulación de una estrategia estructural para el aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía, la cual involucra tecnologías que ya han sido desarrolladas.

diante procesos de transformación biológica, termoquímica y bioquímica.

Considerando lo anterior, y dadas las circunstancias nacionales asociadas con una tasa de crecimiento demográfico constante; los retos financieros, económicos y ambientales actuales y futuros, así como la dinámica climática de Colombia, y considerando que a la fecha no se evidencia implementación de sistemas de generación de potencia híbridos para el aprovechamiento energético de la biomasa; se propone la formulación de estrategias para la construcción de escenarios de abastecimiento energético diversificado, en el marco de la promoción de la seguridad energética, el uso racional y eficiente de los recursos naturales y la minimización de los riesgos ambientales ocasionados por el uso continuado de fuentes energéticas altamente contaminantes. En este orden de ideas, se pretende sentar la bases para construir una alternativa como solución de abastecimiento energético a poblaciones con cobertura parcial de los servicios básicos y con disponibilidad local de residuos agrícolas y/o agroindustriales, como es el caso de las Zonas no interconectadas – ZNI a la red eléctrica nacional donde el uso de estos residuos como fuente de energía puedan ser utilizados en un sistema de generación de potencia híbrido a pequeña escala compacto y modular; que involucre su acoplamiento a una unidad de gasificación de biomasa donde la materia orgánica en fase sólida sea convertida en un combustible en fase gaseosa con el cual pueda generarse energía eléctrica a partir de celdas de combustibles y una turbomáquina. Sin embargo, es necesario durante el nacimiento de estas estrategias que involucren el uso de la biomasa como fuente de energía, el desarrollo y/o implementación de modelos matemáticos que permitan estimar el potencial productivo y energético de la biomasa, así como estimar sus propiedades conociendo su caracterización fisicoquímica, modelos que se presentan y tratan en este capítulo para residuos agrícolas en un contexto colombiano.

Objetivos

Desarrollar una metodología para la estimación del potencial productivo, energético y exergético de residuos agrícolas para propósitos de gasificación

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de los residuos agrícolas susceptibles a ser

- Implementar un modelo matemático para la estimación del potencial productivo, energético y exergético de los residuos agrícolas seleccionados para propósitos de gasificación.
- Identificar y caracterizar el potencial productivo y energético de los residuos agrícolas identificados a nivel nacional, por departamentos y para Zonas No Interconectadas (ZNI) con disponibilidad local de recursos.
- Estimación del potencial de generación de potencia en un sistema híbrido basado en celda de combustible de óxido sólido y una microturbina a gas (SOFC-MGT).

Referente teórico

En 2005, de acuerdo con Sikarwar VS y Zhao M. [9], UNFCCC - *United Nations Framework Convention on Climate Change* fue establecida una definición ampliamente aceptada de lo que considera biomasa:

Un material orgánico no fósil y biodegradable de origen vegetal, animal o proveniente de microorganismos. Se incluyen productos, bio-productos, residuos y desechos agrícolas, forestales y aquellos provenientes de ciertas industrias, así como las fracciones no fósil biodegradables de los residuos sólidos urbanos.

En un sentido amplio, un material puede ser considerado biomasa si es de composición orgánica y es derivada de las plantas y/o animales o sus desechos.

Cuando la radiación solar es interceptada por las plantas el dióxido de carbono del ambiente es convertido en carbohidratos en presencia de agua mediante el proceso de fotosíntesis, y se almacena en forma de energía química en la vegetación terrestre o acuática. A su vez, sirviendo de alimento a los animales, la energía almacenada en las plantas se transfiere a la biomasa animal y se convierte en excreta [10]. Cuando la biomasa es quemada o es utilizada en procesos de conversión energética una vez transformada en otros tipos de combustible más versátiles en fase sólida, líquida o gaseosa el carbono de la biomasa reacciona con el oxígeno del aire para formar dióxido de carbono, el cual es liberado a la atmósfera. De presentarse una combustión completa la cantidad de carbono generado en el proceso es igual a la cantidad que fue absorbida de la atmósfera durante la etapa de crecimiento de la especie vegetal. Por consiguiente, no se identifica una adición neta de CO₂ a la atmósfera y la biomasa puede considerarse como un “sumidero” de carbono. Así, se manifiesta el ciclo de emisión de “zero” carbono [10].

De acuerdo con Anreideat J. *et al.* [11], la gasificación ha probado ser un modo eficiente y viable de utilizar la biomasa como fuente de energía, lo que ha atraído la atención creciente hacia el desarrollo de tecnologías relacionadas con este proceso, principalmente en la producción combinada de calor de proceso y potencia eléctrica, lo que es una tecnología prometedora. Según K y De S. [12], el proceso de gasificación integrado a una planta de generación de potencia combinada es una opción futura sustentable en la generación de potencia de CO₂ neutro, con el cual un ciclo de cogeneración es posible incrementar la eficiencia térmica global de una planta dado el tipo y composición de la fuente.

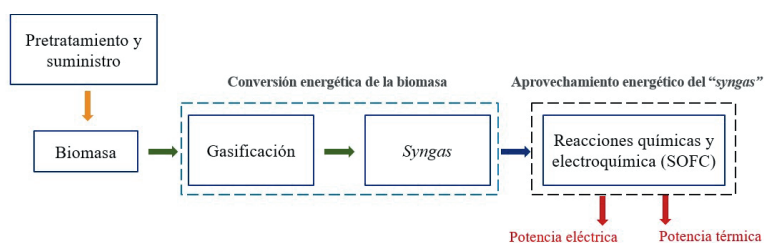
La demanda de biomasa en una planta a pequeña escala puede ser fácilmente suplida por material orgánico de áreas circundantes como los residuos agrícolas y forestales, productos de la industria alimentaria o residuos del procesamiento de la madera. Sin embargo, a pesar de sus ventajas beneficiosas, el desarrollo de estas plantas de generación alimentadas con biomasa no ha sido ampliamente implementadas como se hubiese esperado en países con alta disponibilidad de fuente de energía [13]. En relación a lo anterior, una de las alternativas prometedoras para la co-generación de energía de acuerdo con El-Emam R.S. [14], es la integración de la gasificación de biomasa a celdas de combustible de óxido sólido (SOFC). Según Ud Din Z y Zainal Z.A. [15], estos sistemas pueden operar con eficiencias mayores comparados con sistemas de generación de potencia basados en motores de combustión interna. Eficiencias del orden de 50-60% pueden ser alcanzadas si el flujo de gas que sale de la celda de combustible es utilizado en turbinas a gas y la liberación de calor remanente en la celda de combustible, utilizado en aplicaciones o servicios que requieran calor de proceso.

Actualmente, el escenario más económico para el uso de la biomasa como fuente de energía, es la generación “*co-firing*” en plantas de generación de potencia a carbón. Esto se explica considerando la alta eficiencia eléctrica de estas centrales en comparación con plantas de generación a pequeña escala descentralizadas [16]. Como alternativa, según Ud Din Z y Zainal Z.A., la gasificación de biomasa en un gasificador promete ser una estrategia más eficiente comparada con la combustión de biomasa en ciclos de potencia de vapor, particularmente a pequeña escala. Por otro lado, según Doherty W, Reynolds A y Kennedy D [18], el uso de SOFCs acopladas a sistemas de gasificación de biomasa muestra ser una alternativa de generación prometedora ya que se combinan las bondades de las fuentes de energía renovable y las características de alta

eficiencia de las celdas de combustible. Estos sistemas denominados (BG-SOFC), ofrecen configuración modular ideal en aplicaciones de generación descentralizada de calor y potencia combinada (CHP). A continuación, en la Fig. 1, se presenta esquemáticamente la integración de la fase de conversión energética de la biomasa y aprovechamiento del gas de síntesis “syngas”, la implementación de un sistema integrado BGSOFC.

Figura 1.

Esquema técnico de un sistema integrado Gasificación de Biomasa – Celda de Combustible B SOFC.



Selección de residuos

Son seleccionados como cultivos de interés para el proceso de gasificación, el arroz, el café y la palma de aceite. Para el arroz fueron identificados la paja y la cascarilla como sus principales residuos. Una gran proporción de la paja de arroz es incinerada o dispuesta en cuerpos de agua que ocasiona serios impactos ambientales, y la fracción remate es dispuesta en establos para alimentación equina. La paja de arroz es uno de los residuos que presenta mayor complejidad por ser dispuesta debido a las grandes cantidades producidas, su humedad superior al 70% y su dispersión. Debido a su contenido de humedad no es considerada viable para procesos de conversión termoquímica pero sí para procesos de biodigestión anaeróbica [19]. Por otro lado, a pesar de ser comercializada en establos, granjas y para actividades de jardinería, se estima que el 44% del total de cascarilla generada en el país, la cual se estima entre 280.000 t y 700.000 t por

carilla de arroz es la cobertura exterior del grano, la cual corresponde entre el 14% y el 35% del peso [19].

Para el café fueron identificados los tallos, la pulpa y la cascarilla como sus principales residuos; los tallos son utilizados por los productores en el proceso de tostión y secado de los granos, y representan un excelente producto en los sistemas de compostaje. La pulpa es utilizada por los campesinos como fertilizante y alimento para animales. Su dispersión es significativamente alta, lo que no es considerada viable para procesos de conversión termoquímica. Sin embargo, se ha identificado que la pulpa de café posee un alto potencial para la producción de biogás y etanol dada la composición de su fracción orgánica y su contenido de humedad [19]. Por otro lado, la cascarilla, la cual es obtenida como producto del beneficio del café, es la capa que recubre la semilla, y representa el 4,2% del peso del fruto. Además, posee excelentes propiedades combustibles y es considerada una disponibilidad del 25% para procesos de conversión energética [20].

Para la palma de aceite fueron identificados el rachis y el cuesco como sus principales residuos; se ha identificado que el 83%, y el 57% de estos pueden ser empleados en procesos de conversión energética, como una alternativa al uso que actualmente se les da en el mercado. El rachis, a pesar de presentar un gran potencial para la generación de potencia y producción de fertilizantes orgánicos, debido a su alto contenido de potasio en las cenizas, induce problemas de operación en celdas y gasificadores [19]. Por otro lado, el cuesco o endocarpio es un material duro que protege la almendra del fruto, tiene excelentes propiedades combustibles, posee baja humedad y tiene la ventaja de presentarse de manera concentrada, a diferencia de otros residuos que se presentan de manera más dispersa e implican mayores costos de recolección y transporte hasta los sitios de procesamiento [21].

De acuerdo con lo anterior, es seleccionada la cascarilla de arroz, la cascarilla de café y el cuesco de palma de aceite ya que poseen un alto contenido de carbono, lo que indica una mayor disponibilidad de formación de gases combustibles; bajo contenido de materia inorgánica, lo que permite menores tasas de formación de ceniza; un alto contenido de material volátil, lo que aumenta el potencial para la generación de potencia; una humedad entre el 10-15%, lo que permite prescindir del proceso de secado “*in situ*”, lo cual es ventajoso considerando que este es un

proceso de una demanda energética, un porcentaje de azufre menor al 1%, lo cual contribuye a disminuir la probabilidad de generación de escoria; un bajo porcentaje de potasio en la ceniza, lo que disminuye la probabilidad de ocurrencia de aglomeración y desfluidización del lecho si la gasificación se lleva a cabo bajo régimen de lecho fluidizado, permitiendo prolongar la vida útil de los equipos y garantizar el régimen de flujo al interior del gasificador [19,20,22,23]. A continuación, en la Tabla 1 se presenta el valor de área cultivada, rendimiento de cultivo y producción anual promedio entre los años 2007 y 2017 de los cultivos seleccionados, construida a partir de la base de datos de acceso libre *Agronet MinAgricultura-Red de Información del Sector Agropecuario Colombiano* [24].

Tabla 1.

Área cosechada, producción y rendimiento promedio nacional de cultivos agrícolas de interés para procesos de transformación termoquímica.

Arroz (Total)	396.693	}	2.234.654
Café	759.009	↓	749.320

Modelos matemáticos de estimación de potencial

Potencial productivo

Mediante la ec.(1), es posible estimar el potencial teórico nacional de generación de residuo por cultivo CR^* [t/año], considerando aquellos cultivos que, de acuerdo con su producción promedio anual durante los años 2007 y 2017, presentan potencialidad para ser utilizados en procesos de conversión energética; y sólo aquellos que, de acuerdo con su composición fisicoquímica pueden ser utilizados en procesos de gasificación [7].

$$CR^* = \left(P^* \right) \quad RPR^*$$

(1)

*

le, RPR^* , es la tracción de cultivo que se transforma en residuo para cada uno de los cultivos. Por otro lado, sólo puede disponerse de una fracción del residuo para ser aprovechado como recurso energético por limitación del mercado agrícola actual, el potencial técnico nacional de ración de biomasa residual agrícola $CR_{\&}^*$ [t/año], que podría aprovecharse para la actividad ya mencionada, puede estimarse entonces, mediante la ec.(2):

$$CR_{\&} = (CR^* \& RPR_{\&}^*) \quad (2)$$

onde, $RPR_{\&}^*$ es el factor de disponibilidad, el cual representa la fracción de residuo que puede provechado como recurso energético en procesos de conversión energética. Por otro lado, con n de estimar el potencial productivo de los residuos generados a partir de biomasa residual :ola con potencialidad para la generación de energía mediante procesos de gasificación de asa en Colombia, y disponibles por departamento $CR_{\&}$, se propone la ec.(3):

$$CR_{\&} = ((CR_{\&}^* (RPR_{\&}^*, 0)) \quad (3)$$

onde, $RPR_{\&}^*$, es el porcentaje de participación mayoritario anual promedio de residuo generado departamento y por cultivo, calculado al considerar sólo aquellos departamentos que :esentan una participación conjunta entre el 95% y el 98% de la producción nacional promedio ultivo específico considerando el registro histórico disponible entre los años 2007-2017.

ncial energético

on base en los estudios de investigación llevados a cabo por Gonzalez-Salazar M.A *et al.* [7], esenta el modelo analítico con el cual es posible estimar el potencial energético bruto nacional esiduos agrícolas, el cual, define la disponibilidad de materia orgánica para procesos de ersion energética. Así, considerando el potencial productivo de generación de residuo onible por cultivo, la fracción másica de la humedad en la biomasa $x_{3,*}$, el poder calorífico por luo, y la entalpía de vaporización del agua a 25 °C definida como $h_{5,678}$, el potencial energético

mediante la ec.(4):

$$E_{\text{net}}^* = (CR_{\text{net}}^* - PC_{\text{net}}^*) \quad (4)$$

donde, el poder calorífico inferior en base húmeda PCI_{net}^* , necesario en la estimación del potencial energético neto de las biomásas, considera la fracción másica de agua en fase líquida en cada biomasa (x_3), y puede calcularse a partir del poder calorífico en base seca mediante la ec. [26]:

$$PCI_{\text{net}}^* = (1 - x_3)PCS_{\text{net}}^* - x_3h_{5,678}$$

donde, el contenido energético de la biomasa o Poder Calorífico Superior - PCS , es la cantidad de energía almacenada por unidad de masa y es usualmente medida como el calor de combustión, la cual, es la energía total liberada en forma de calor cuando se lleva a cabo la combustión completa utilizando oxígeno como oxidante bajo condiciones estándar, de la cual se obtienen como productos dióxido de carbono, agua en fase líquida, nitrógeno y dióxido de azufre [27]. Así, el poder calorífico superior PCS_{net}^* , en base seca (% db) de la biomasa residual agrícola puede estimarse a partir de los porcentajes másicos de carbono (z_D), hidrógeno (z_H), azufre (z_S), nitrógeno (z_N), oxígeno (z_O) y ceniza (z_G) en base seca obtenidos mediante análisis elemental [28]. De acuerdo con la correlación descrita en la ec.(6), es posible estimar el poder calorífico superior de la biomasa residual agrícola en base seca en [kJ/kg]. Esta correlación propuesta por [26,28], posee un error porcentual medio del 1,45% y un error (MBE) del 0,01%. Esta correlación permite la estimación del poder calorífico superior de combustibles sólidos líquidos y gaseosos la cual incluye biomasa terrestre y acuática, biomasa de residuos industriales, residuos sólidos urbanos, carbón y coque para fracciones de porcentaje en peso de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y ceniza comprendidos entre los rangos $0\% \leq z_D \leq 92,1\%$, $0,43\% \leq z_H \leq 25,15\%$, $0,00\% \leq z_S \leq 50,00\%$, $0,00\% \leq z_N \leq 5,60\%$, $0,00\% \leq z_O \leq 94,0\%$ y $0,00\% \leq z_G \leq 100,00\%$.

ectivamente. Esta correlacion, la cual se presenta en la ec.(6), ha sido adoptada por la *Agencia Nacional de Energía – IEA* para estimar el poder calorífico de diferentes biomásas [28].

$$PCS:B^*_{*}= 34,91z_C + 117,83z_H + 10,05z_S - 1,51z_N - 10,34z_O - 2,11z_A \tag{6}$$

otro lado, la relación entre el poder calorífico superior $PCS:B^*_{*}$, y el poder calorífico inferior B^*_{*} , en base seca para la biomasa residual agrícola se expresa mediante la ec.(7) [26]:

$$PCI:B^*_{*}= PCS:B^*_{*}- W100z6_X \frac{MW6}{MW6+778 h5,H2O} \tag{7}$$

onde, MW_{678} , MW_{67} , y $h_{5,678} = 2441,7$ kJ/kg [29], representan el peso molecular del agua, el peso molecular del hidrógeno y la entalpía de vaporización del agua a 25°C, respectivamente. A continuación, en la Tabla 2 y la Tabla 3, se presenta el análisis elemental y el análisis próximo en base seca de las biomásas objeto de este estudio. Fueron considerados valores de referencia para la comparación de la composición de los residuos de interés en base seca libre de ceniza (w/w % *d.a.f*) y en base húmeda (w/w% *a.r.b*).

Tabla 2.
Análisis elemental de la biomasa residual agrícola (w/w%)

Residuo	C	H	O	N	S	Ref.
<i>1. Cascas de arroz (d.a.f), 2. Cascas de café (d.a.f), 3. Cascas de palma de aceite (d.a.f).</i>						

Residuo	FC	A	M	Ref.
<i>1. Cascas de arroz (a.r.b), 2. Cascas de café (a.r.b), 3. Cascas de palma de aceite (a.r.b), Material volátil; FC: Carbono fijo; A: Ceniza; M: Humedad.</i>				

Potencial exergético

Con base en de la correlación utilizada por [32,33], y planteada por Szargut *et al.* [34], propone la ec.(8), elaborada con el fin de estimar el potencial exergético nacional anual de biomásas seleccionadas $Ex_{i,b,c}$.

$$Ex_{i,b,c} = (CR_{i,b,c} \cdot ex_{i,b,c} - x_{i,b,c} \cdot \beta) \cdot 10^6 \quad (8)$$

Considerando las correlaciones propuestas por Szargut y Styryska, la exergía química de la fracción orgánica de la biomasa en base seca [kJ/kg], puede calcularse mediante la ec.(9) [35]. La exergía química asociada a la fracción inorgánica o ceniza, la cual representa una contribución menos del 0,2 % respecto de la exergía química de la fracción orgánica, podría depreciarse aludiendo a la recomendación establecida por Szargut *et al.* [34]. Bajo esta consideración, puede decirse entonces que $ex_{i,b,c} \approx ex_{i,b}$.

$$ex_{i,b} = \beta \cdot PCI_{i,b} + 9683 \quad (9)$$

donde, β es la tasa de exergía química estándar para compuestos sólidos como la biomasa residual agrícola, la cual puede calcularse mediante la correlación presentada en la ec.(10) bajo la condición $z_8/z_D \leq 2$ [36]:

$$\beta = \frac{1,0414 + 0,0177 Wz^6 X - 0,3328 Wz^8}{1 + 0,0537 Wz^6 X_D} \cdot z_D - 0,4021 Wz^8 z_D X \quad (10)$$

Finalmente, con el fin de estimar el potencial energético y exergético de residuo agrícola generado y disponible por cultivo y por departamento $E_{i,b}$ y $Ex_{i,b}$, se propone la ec.(11):

(12), las cuales consideran el porcentaje de participación de cada departamento en la producción de un determinado residuo agrícola RPR_{*} .

$$E_{*} = \left(\begin{matrix} E_{*} & RPR_{*} \\ * & 0 \end{matrix} \right)$$

.

&

.

tencial energético de la gasificación de biomasa en un sistema SOFC-MGT

Basado en los estudios llevados a cabo por Gonzalez-Salazar MA *et al.* [7], se propone la ec.(13) a ec.(14) para así estimar el potencial energético nacional de la gasificación de la biomasa agrícola en Colombia en [TJ] de los cultivos seleccionados en un sistema de potencia basado en una celda de combustible de óxido sólido y una microturbina a gas. ($j = 1$: Cascarilla de arroz, $j = 2$: Cascarilla de café, $j = 3$: Cusco de palma de aceite)

$$E_{qr} = 3,154 \times 10^6 \left(\begin{matrix} x & u_{kw,0} \\ 0 & CR_{*} \end{matrix} \right) + kx,0y$$

$$k_{w,0} = 2,219; \quad j = 1; \quad u_{kw,0} = 0,555; \quad j = 2; \quad k_{x,0} =$$

667;

$j = 2;$

1,716; $j = 3$

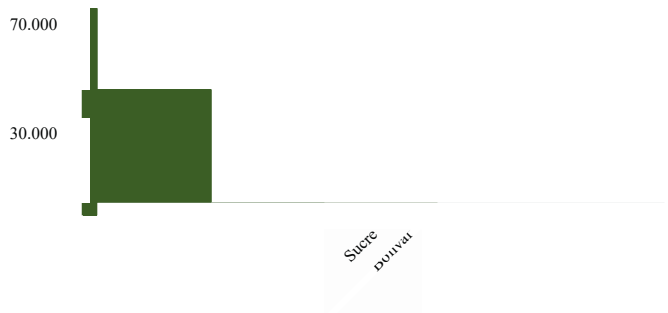
0,633; $j = 3;$

Resultados

De acuerdo con la ec.(2) y la ec.(3), se tiene que el potencial productivo nacional teórico y técnico de generación por cultivo y por residuo es de 1.374.833 t/año y 390.341 t/año respectivamente. De lo anterior, se infiere que sólo el 18,5 % de la producción nacional anual promedio de los cultivos anteriormente mencionados estimada en 7.436.314 t/año, corresponde a la producción anual promedio de los residuos seleccionados, y de estos, cerca del 28,4% de acuerdo con las limitaciones del mercado, podría ser utilizados en proceso de conversión energética. Así mismo, se identifica que sólo el 5,25% de la producción nacional anual promedio de los cultivos de interés, corresponde a residuos que podrían aprovecharse. Fue identificado que el departamento del Meta posee el mayor potencial productivo de generación de residuos que podrían utilizarse como materia prima para procesos de gasificación de biomasa. Por otro lado, fue identificado que el departamento de Risaralda posee el menor potencial productivo de los residuos considerados con una participación de ~0,14% y que los departamentos del Meta, Tolima, Casanare, Cesar, Huila y Santander donde se concentra aproximadamente el 80% de la generación de residuos, presentan conjuntamente una potencialidad productiva de residuos que pueden ser aprovechados en procesos de gasificación de biomasa de ~299.317 t/año.

Fue estimada una producción promedio de 377.685 t/año de residuos con disponibilidad para ser aprovechados en procesos de gasificación de biomasa, la cual representa cerca del 96,8% de la totalidad del potencial de generación de residuos estimada por parte de 18 de los 32 departamentos que representan entre el 95% y el 98% de participación en la generación de dichos residuos. Por otro lado, se estima que, en promedio, alrededor de 12.656 t/año del potencial de generación de residuos, el cual representa entre el 2% y el 5% restante de participación por parte de los otros 14 departamentos, podría no ser aprovechado fácilmente debido a que no se podría garantizar la concentración de los residuos en una ubicación geográfica específica que permita un flujo de alimentación mínimo recomendable de 100 kg/h equivalente a 876 t/año de residuo hacia un gasificador a pequeña escala [37]. A continuación, en la Fig. 2, se presenta el potencial productivo departamental de los cultivos agrícolas seleccionados para propósitos de gasificación.

Figura 2



Para el caso de los departamentos de Caldas, Quindío y Risaralda; Valle del Cauca, Cauca y Nariño; Cundinamarca, Santander, Norte de Santander y Cesar; cuyo potencial de generación individual de cascarilla de café se encuentra por debajo de este límite recomendado, se plantea que residuo sea centralizado en uno de los departamentos de cada uno de los tres grupos, para así alcanzar un potencial de alimentación por encima del límite de ~1.558 t/año, ~1.574 t/año y ~1.046 t/año, respectivamente.

A partir de los valores analizados de la base de datos de acceso libre [24], se identifica que los departamentos que poseen Zonas No Interconectadas – ZNI con acceso a energía eléctrica son: Nariño, Chocó, Cauca, Guainía, Caquetá, Amazonas, Antioquia, Putumayo, Valle del Cauca, Cúcuta, Vichada, Meta, Guaviare, Magdalena y Casanare. Por otro lado, se identifica que los departamentos que no poseen Zonas No Interconectadas corresponden a la mayor parte de la región Caribe y la región Andina que comprende el centro del país. Mediante un análisis de Pareto, se identificó que los departamentos de Nariño, Chocó, Cauca y Guainía concentran aproximadamente 80% de las localidades no interconectadas a la red eléctrica del país a una proporción del 38,51%, 14%, 11,94% y 3,76%, respectivamente.

Por otro lado, dado que de los cultivos seleccionados mediante los criterios anteriormente puestos no presentan participación representativa a nivel nacional por parte de los departamentos

de Nariño y Cauca, los cuales, particularmente concentran más del 50% de las ZNI del país. Se propuso incluir la participación del cultivo de arroz secano manual para el departamento del Chocó, el cual representaría una producción promedio de cascarilla de 2.771 t/año para este departamento, abriendo la posibilidad de generación eléctrica a partir de proceso de gasificación de biomasa. A partir de los valores analizados de la base de datos de acceso libre [24], fue identificado que el 99,3% de los 45.517 usuarios de Nariño, el 53,9% de los 29.715 usuarios del Chocó, el 100 % de los 14.114 usuarios del Cauca y el 70,9 % de los 4.439 usuarios de Guainía no interconectados, suplen sus necesidades de energía eléctrica mediante generadores diésel.

Para el departamento de Guainía no se registra producción de los cultivos de interés para el presente estudio. Sin embargo, se identificó que cerca del 87,9% de la producción de cultivos agrícolas, se concentra en los cultivos de yuca y plátano, con una participación del 65,59% y 22,33%, respectivamente. Se ha identificado que los residuos de estos cultivos son más apropiados para procesos de fermentación y biodigestión anaeróbica. Por otro lado, se identificó que, si el departamento del Meta manifiesta ser el departamento con mayor potencial para la generación de energía a partir de biomasa residual agrícola con una participación de ~21,6% entre los departamentos identificados, sólo concentra el 1,23% de las ZNI. Es así como se propone como una solución alternativa para la generación de energía eléctrica descentralizada a partir de residuos agrícolas en los departamentos de Nariño, Chocó y Cauca, el aprovechamiento energético de biogás generado a partir de la biodigestión anaeróbica de la paja de arroz y la pulpa de café, como sistemas de generación de potencia.

A continuación, en la Tabla 4, de acuerdo con los modelos expuestos, se presenta el valor del poder calorífico superior e inferior en base seca, el poder calorífico inferior en base húmeda y la exergía química de la fracción orgánica e inorgánica de las biomásas seleccionadas.

Tabla 4.

Poder calorífico de biomasa residual agrícola destinada a procesos de gasificación

Residuo	$PCS_{bio}[MJ]$	$PCI_{bio}[MJ/kg]$	$w_{bio}[MJ/kg]$	$x^{ch_{om}}[MJ/kg]$	$ex^{ch_{im}}[MJ]$
---------	-----------------	--------------------	------------------	----------------------	--------------------

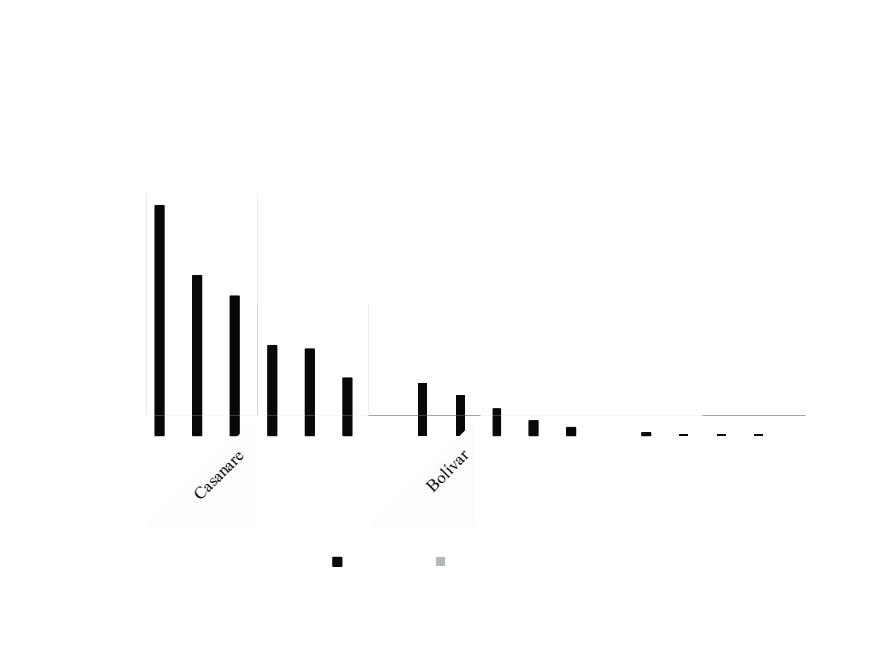


fue estimado un potencial energético y exergético nacional por residuo de aproximadamente 5.805 TJ y 7.445 TJ por año, lo cual corresponde a la disponibilidad energética que podría aprovecharse con fines de generación de potencia y calor combinado (CHP) en el sistema de potencia híbrido acoplado a un proceso de gasificación de biomasa BG-SOFC-MGT. En continuación, en la Tabla 5, se presentan los potenciales energético y exergético por residuo considerando el valor promedio anual en [TJ] de los potenciales productivos a nivel nacional.

Tabla 5.
Potencial energético y exergético bruto de la biomasa residual agrícola objeto de estudio.

Cultivo*	Residuo	$n_{r,i}$ [t/año]	$Enbio,i$ [TJ]	$Exnbioi$ [TJ]
2	Cascarilla	67.775	1.954,6	2.603,7
5	Cascarilla	7.868	110,9	147,8

*1. Arroz (total). 2. Arroz riego. 3. Arroz seco mec. 4. Arroz seco manual. 5. Café. 6. Palm.



residuos agrícolas de interés para propósitos de conversión energética en procesos gasificación.

Figura. 3.

Potencial energético y exergético bruto departamental para propósitos de gasificación.

Fue identificado que el departamento del Meta posee el mayor potencial energético y exergético para propósitos de generación a partir de cascarilla de arroz y cuesco de palma. Así mismo se identificó que el 84 % y el 78,6% del potencial energético y exergético total a partir de los residuos seleccionados se concentra en los departamentos del Meta, Tolima, Casanare, Santander, Cesar, Santander y Norte de Santander. Por otro lado, dado que fueron considerados sólo aquellos departamentos cuya producción conjunta representa un 96,2 % de la generación de residuos se tiene que el potencial energético y exergético considerando los 18 departamentos identificados es de ~ 5.585 TJ y ~ 7.161 TJ, respectivamente.

El potencial energético y exergético conjunto para la cascarilla de café, residuo que mostró bajo potencial productivo por debajo del límite de 876 t/año para los departamentos ubicados en el centro occidente del país: Caldas, Quindío y Risaralda, se tiene un potencial productivo, energético y exergético de ~ 1.558 t/año, $\sim 21,97$ TJ y $\sim 29,26$ TJ, respectivamente. Por otro lado, entre los departamentos ubicados en la zona suroccidente del país para el mismo residuo: Valle del Cauca y Nariño, se tiene un potencial productivo, energético y exergético conjunto de ~ 1.574 t/año, $\sim 22,19$ TJ y $\sim 29,6$ TJ respectivamente. Finalmente, entre los departamentos ubicados en la zona centro y nororiente del país para el mismo residuo: Cundinamarca, Santander, Norte de Santander y Cesar, se tiene un potencial productivo, energético y exergético conjunto de ~ 1.046 t/año, ~ 14 TJ y $\sim 19,7$ TJ respectivamente. A continuación, en la Tabla 6, se presenta el potencial energético y exergético bruto de los residuos agrícolas provenientes de los residuos de café y arroz secos.

ual para el departamento de Nariño y Chocó promedio anual, considerando su alta concentración de ZNI.

la 6.
ncial energético exergético bruto anual de los residuos agrícolas provenientes de los cultivos afé y arroz seco manual para el departamento de Nariño y Chocó.

epartamento	Cultivo	esiduo	[t/a	$Ex^{d_{bio}}$	# Usuarios ZNI	# Usuarios con plantas
Nariño	Café	carilla	15	5,9	45.517	45.187
Guainía	-	-	-	-	4.439	3.146

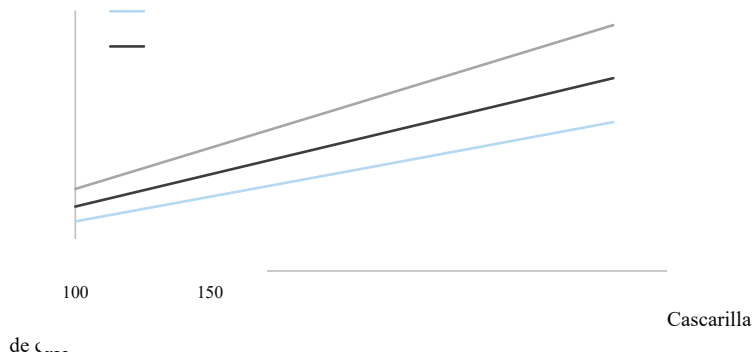
onsiderando que el consumo de energía eléctrica por habitante en Colombia equivale a ximadamente 984 kWh/año y que cada usuario representa una vivienda compuesta en medio por ~3,6 personas [38,39]; para Nariño, empleando conjuntamente los residuos de café y co de palma y suponiendo que toda la energía contenida en el residuo pudiese aprovecharse onsiderar las limitaciones impuestas por la Segunda Ley de la Termodinámica cuando este es uechado en un sistema de generación de potencia, se estima que podría generarse energía iente para cerca de 23.824 habitantes por año como máximo, lo que equivaldría a un imiento del 14,5% de los usuarios no interconectados en este departamento y a una posibilidad stitución tecnológica del 14,64% de generadores diésel mediante los cuales se abastecen. Para có, podría generarse energía suficiente para cerca de 9.113 habitantes por año como máximo, ue equivaldría a un cubrimiento del 8,52% de los usuarios no interconectados en este artamento y a una posibilidad de sustitución tecnológica del 15,79%. Finalmente, para el artamento del Cauca podría generarse energía suficiente para cerca de 2.474 habitantes por año o máximo, lo que equivaldría a un cubrimiento del 4,87% de los usuarios no interconectados ste departamento y a una posibilidad de sustitución tecnológica igualmente del 4,87%.

on el fin de estimar el potencial energético teórico anual E^* de los residuos agrícolas siderados en el presente estudio, se realizó un análisis de regresión donde se presenta la

del flujo de biomasa procesada para cada uno de los residuos considerados. En esta se observa que la relación entre ambas variables es lineal, donde para los tres casos, se obtuvo un coeficiente de correlación $R^2 = 1$. Así mismo, fue identificado que, para la cascarilla de arroz, la cascarilla de café y el cuesco de palma de aceite se tiene una generación neta de potencia de 1,716 kW/(kg/h), 2,219 kW/(kg/h) y 2,831 kW/(kg/h), respectivamente. A continuación, en la Fig. 4, se presentan los resultados de dicho análisis.

Figura 4.

Potencia del sistema en función del flujo de biomasa residual procesada

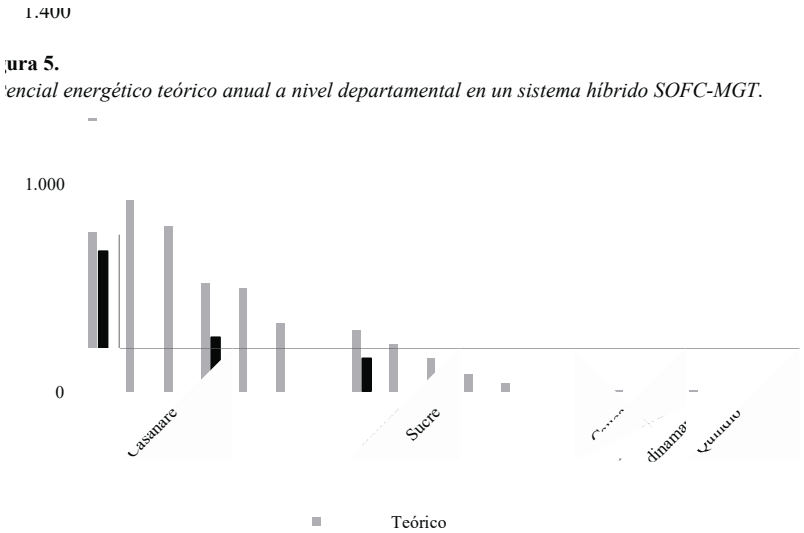


A continuación, en la Fig. 5, se presenta el potencial energético y exergético departamental de los residuos agrícolas de interés.

1.400

Figura 5.

Potencial energético teórico anual a nivel departamental en un sistema híbrido SOFC-MGT.



Continuación, en la Tabla 7, se presenta el potencial energético y exergético teórico de la gasificación de biomasa a partir los residuos agrícolas provenientes de los residuos de café y arroz seco manual para el departamento de Nariño y Chocó, considerando su aprovechamiento en un sistema de generación de potencia híbrido SOFC-MGT acoplado a una unidad de gasificación de biomasa.

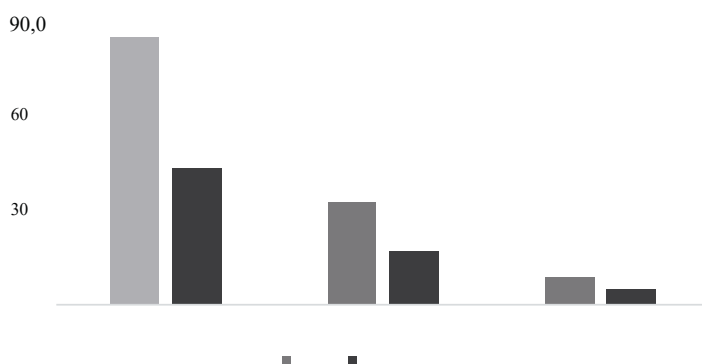
Tabla 7.
Potencial energético teórico anual de los residuos agrícolas provenientes de los cultivos de café y arroz seco manual para el departamento de Nariño y Chocó.

Nariño	Café	Cascarilla	2,54
Guainía	-	-	-

Continuación, en la Fig. 6, se presenta el potencial energético y exergético teórico de los departamentos donde se concentra el mayor porcentaje de ZNI, de la gasificación de los residuos agrícolas de interés para propósitos de conversión energética en un sistema de generación de potencia híbrido SOFC-MGT.

Figura 6.

Potencial energético y exergético teórico a nivel departamental de la gasificación de biomasa aprovechamiento en un sistema de generación de potencia híbrido SOFC-MGT.



De la Figura 6, se estima que, para el departamento de Nariño, podría generarse energía suficiente a partir de sistemas de generación de potencia híbridos, para cerca de 12.124 habitantes por año como máximo, lo que equivaldría a un cubrimiento del 7,40% de los usuarios no interconectados en este departamento y a una posibilidad de sustitución tecnológica del 7,45% de generadores de potencia mediante los cuales se abastecen. Para Chocó, podría generarse energía suficiente para cerca de 4.827 habitantes por año como máximo, lo que equivaldría a un cubrimiento del 4,51% de los usuarios no interconectados en este departamento y a una posibilidad de sustitución tecnológica del 8,36%. Finalmente, para el departamento del Cauca podría generarse energía suficiente para cerca de 1.408 habitantes por año como máximo, lo que equivaldría a un cubrimiento del 2,77% de los usuarios no interconectados en este departamento y a una posibilidad de sustitución tecnológica del 4,51%.

1.408 habitantes por año como máximo, lo que equivaldría a un cubrimiento del 2,77% de los usuarios no interconectados en este departamento y a una posibilidad de sustitución tecnológica del 4,51%.

Conclusiones

- Aun cuando los departamentos con el mayor potencial para la gasificación de biomasa considerando los residuos estudiados no exhiben un porcentaje significativo de Zonas No Interconectadas al sistema eléctrico nacional, se propone la implementación de sistemas que puedan utilizar estas fuentes para la generación de energía y así, no desaprovechar dicho potencial.
- Se concluye que, el departamento del Meta, Tolima, Casanare, Cesar, Santander y Norte de Santander, presentan el mayor potencial energético, dado que son los departamentos donde se concentra un poco más del 80% del potencial energético conjunto a nivel nacional. Esto: en particular tienen en común, la producción de palma de aceite a excepción del departamento del Tolima.
- Se concluye que, el departamento del Huila, a pesar de poseer un gran potencial productivo de residuos del café, su potencial energético asociado al aprovechamiento de estos en un sistema de generación de potencia híbrido resultó ser menor al del departamento del Magdalena y de Norte de Santander, cuyo potencial productivo de este residuo fue menor a este.
- Se concluye que, el cascoso de palma de aceite tiene mayor potencial para la generación de energía en el sistema híbrido, dado que fue identificado que, utilizando este residuo, el sistema tiene una capacidad de generación neta de potencia de 2,831 kW/(kg/h), superior a la cascarilla de arroz y la cascarilla de café, con los cuales el sistema propuesto posee una capacidad de generación neta de potencia de 1,716 kW/(kg/h) y 2,219 kW/(kg/h), respectivamente.
- Entre los departamentos en los cuales se presentan ZNI con acceso a energía eléctrica mediante generadores diésel, Nariño presenta un mayor potencial energético asociado al aprovechamiento de los residuos que fueron evaluados en el presente estudio, y principalmente, a diferencia de los departamentos del Chocó y Cauca, por ser un departamento que cultiva la palma de aceite.

Los autores ofrecen un especial agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión de la Universidad Tecnológica de Pereira y al grupo de investigación en Gestión Energética – GENERGÉTICA, por el apoyo recibido para el desarrollo de este capítulo.

Bibliografía

- [1] Cheng Y, Thow Z, Wang C-H. Biomass gasification with CO₂ in a fluidized bed. *Powder Technol* 2016;296:87–101. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.12.041>.
- [2] El Bassam N. *Handbook of Bioenergy Crops: A Complete Reference to Species, Development and Applications*. London: 2010.
- [3] U.S Energy Information Administration. *International Energy Outlook 2016: With Projections to 2040*. 2016.
- [4] Gómez-Barea A, Leckner B. Modeling of biomass gasification in fluidized bed. *Prog Energy Combust Sci* 2010;36:444– 509. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.12.002>.
- [5] Long H, Li X, Wang H, Jia J. Biomass resources and their bioenergy potential estimation: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;26:344–52. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.035>.
- [6] Jia J, Abudula A, Wei L, Sun B, Shi Y. Thermodynamic modeling of an integrated biomass gasification and solid oxide fuel cell system. *Renew Energy* 2015;81:400–10. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.030>.
- [7] Gonzalez-Salazar MA, Morini M, Pinelli M, Spina PR, Venturini M, Finkenrath M, et al. Methodology for estimating biomass energy potential and its application to Colombia. *Appl Energy* 2014;136:781–96. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.004>.
- [8] Unidad de Planeación Minero-Energética-UPME. *Potencialidades de los cultivos energéticos y residuos agrícolas en Colombia*. 2003.
- [9] Sikarwar VS, Zhao M. *Biomass Gasification*. Elsevier Inc.; 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10533-0>.
- [10] Saidur R, Abdelaziz EA, Demirbas A, Hossain MS, Mekhilef S. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15:2262–89. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>.

A review of state of the art technology and near future perspectives. *Appl Therm Eng* 2013;50:1407–17. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.040>.

Jana K, De S. Biomass integrated gasification combined cogeneration with or without CO₂ capture – A comparative thermodynamic study. *Renew Energy* 2014;72:243–52 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.027>.

Amirante R, Tamburrano P. Novel, cost-effective configurations of combined power plant: for small-scale cogeneration from biomass: Feasibility study and performance optimization *Energy Convers Manag* 2015;97:111–20. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.047>.

El-Emam RS. Thermal modeling and efficiency assessment of an integrated biomass gasification and solid oxide fuel cell system. *Int J Hydrogen Energy* 2015;40:7694–706 <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.02.061>.

Ud Din Z, Zainal ZA. Biomass integrated gasification-SOFC systems: Technology overview. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;53:1356–76 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.013>.

Bang-Møller C, Rokni M, Elmegaard B. Exergy analysis and optimization of a biomass gasification, solid oxide fuel cell and micro gas turbine hybrid system. *Energy* 2011;36:4740–52. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.05.005>.

Ud Din Z, Zainal ZA. Biomass integrated gasification-SOFC systems: Technology overview. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;53:1356–76 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.013>.

Doherty W, Reynolds A, Kennedy D. Process simulation of biomass gasification integrated with a solid oxide fuel cell stack. *J Power Sources* 2015;277:292–303 <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.11.125>.

Tibocha Guzmán DA. Fluid-dynamic analysis of a fluidized bed reactor. 2018.

Rodríguez Valencia N, Zambrano Franco DA. Los subproductos de café: Fuente de energía renovable. *Av Técnicos Cenicafe* 2010;328:8.

Gómez A, Rincón S, Klose W. Carbón activado de cuesco de palma: Estudio de termogravimetría y estructura. Universidad Nacional de Colombia - Universidad de Kassel 2010.

Cai J, He Y, Yu X, Banks SW, Yang Y, Zhang X, et al. Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;76:309–22. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.072>.

Sánchez RA, Durán Peralta HA, Aguiar Urriago LM, Uribe Aldana N, Rojas Forero AYY. Modelo para la gasificación del cuesco de palma aceitera. *Ingenium* 2017;18.

- [24] Ministerio de Agricultura de Colombia. Agronet minagricultura.gov.co.
- [25] (UPME) U de PME. Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. 2010.
- [26] Peduzzi E, Boissonnet G, Maréchal F. Biomass modelling: Estimating thermodynamic properties from the elemental composition. *Fuel* 2016;181:207-216. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.111>.
- [27] Eboh FC, Ahlström P, Richards T. Estimating the specific chemical exergy of municipal solid waste. *Energy Sci Eng* 2016;4:217–31. <https://doi.org/10.1002/ese3.121>.
- [28] Song G, Xiao J, Zhao H, Shen L. A unified correlation for estimating specific chemical exergy of solid and liquid fuels. *Energy* 2012;40:164–171. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.016>.
- [29] Çengel YA, Boles MA. Thermodynamics: An Engineering Approach. Eighth. Mc G Hill; 2015.
- [30] Vélez JF, Chejne F, Valdés CF, Emery EJ, Londoño CA. Co-gasification of Colombian and biomass in fluidized bed: An experimental study. *Fuel* 2009;88:424–431. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.10.018>.
- [31] Cáceres Martínez LE. Technical evaluation of available residual biomass in Colombia for its thermochemical conversion in fluidized bed reactors. Universidad Nacional de Colombia; 2018.
- [32] Qian H, Zhu W, Fan S, Liu C, Lu X, Wang Z, et al. Prediction models for chemical exergy of biomass on dry basis from ultimate analysis using available electron concepts. *Energy* 2017;131:251–8. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.037>.
- [33] Zhang Y, Zhao W, Li B, Zhang H, Jiang B, Ke C. Two equations for estimating the exergy of woody biomass based on the exergy of ash. *Energy* 2016;106:400–407. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.040>.
- [34] Szargut J, Morris DR, Steward FR. Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes. Springer-Verlag; 1988.
- [35] Song G, Shen L, Xiao J. Estimating specific chemical exergy of biomass from basic analysis data. *Ind Eng Chem Res* 2011;50:9758–66. <https://doi.org/10.1021/ie200534n>.
- [36] Manatura K, Lu J, Wu K, Hsu H. Exergy analysis on torrefied rice husk pellet in fluidized bed gasification. *Appl Therm Eng* 2017;111:1016–1024. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.135>.
- [37] Diniz Filho PT, Silveira JL, Tuna CE, Lamas WDQ. Energetic, ecologic and fluid-dynamics analysis of a fluidized bed gasifier operating with sugar cane bagasse. *Appl Therm Eng* 2013;57:116–24. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.01.045>.

Ghaffarpour Z, Mahmoudi M, Mosaffa AH, Garousi Farshi L. Thermoeconomic assessment of a novel integrated biomass based power generation system including gas turbine cycle solid oxide fuel cell and Rankine cycle. *Energy Convers Manag* 2018;161:1–12 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.071>.

Promigas. Informe del Sector Gas Natural 2018. 2018.

**Vicerrectoría de Investigaciones,
Innovación y Extensión**
Colección Trabajos de Investigación

eISBN 978-958-722-497-9